

ИМИТАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СВЕТОДИОДЫ СХЕМНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ОБЪЕМНЫХ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ТОКА

© 2021 г. А. В. Градобоев^{a,d,*}, К. Н. Орлова^{b,**},
А. В. Симонова^c, В. В. Седнев^d

^a Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

^b Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^c Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

^d Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов
Россия, 634034, Томск, ул. Красноармейская, 99а

*e-mail: gava@tpu.ru

**e-mail: KNorlova@mephi.ru

Поступила в редакцию 02.02.2021 г.

После доработки 04.03.2021 г.

Принята к публикации 16.03.2021 г.

Описана методика физического моделирования влияния объемных каналов утечки тока (дислокаций) на электрофизические и светотехнические характеристики светодиодов путем подключения параллельно p – n -переходу светодиода омического сопротивления или другого p – n -перехода. Установлены соотношения, позволяющие определить изменение электрофизических и светотехнических характеристик светодиодов при воздействии различных внешних факторов (ионизирующего излучения, длительной эксплуатации и т.д.). Используя полученные соотношения, можно определить электрофизические характеристики дислокаций по изменению электрофизических и светотехнических характеристик светодиодов при учете роли дислокаций. На основе известных литературных данных показана эффективность использования установленных соотношений при анализе характеристик светодиодов, подвергнутых внешним воздействиям.

DOI: 10.31857/S0032816221040157

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени известно достаточно большое количество работ о способности дислокаций формировать объемные каналы утечки тока в различных полупроводниковых материалах, используемых для изготовления изделий электронной техники [1–6]. Особо следует отметить работу [7], в которой путем прямых экспериментов показано влияние дислокаций на вольт-амперную характеристику диодов с барьером Шоттки $\text{Au}-n^+-\text{GaAs}$.

Светоизлучающие диоды (с.д.) получили широкое распространение [8, 9] и находят применение в контрольно-измерительной и осветительной аппаратуре, в космической технике и ядерной энергетике. По условиям эксплуатации на с.д. могут воздействовать различные виды ионизирующего излучения, что требует знаний о закономерностях изменения их параметров при ком-

плексном и комбинированном воздействии излучений в процессе длительной эксплуатации.

В результате различных исследований установлено, что снижение мощности излучения с.д. при воздействии различных внешних факторов обусловлено проявлением дислокаций в их активной области [10–13].

С другой стороны, анализ известных литературных данных по влиянию дислокаций на электрофизические и светотехнические характеристики с.д. позволяет сделать вывод, что имеющиеся результаты только качественно описывают изменения характеристик с.д. при воздействии различных внешних факторов.

Отсутствие соотношений, устанавливающих связь между вольт-амперной (в.а.х.) и ватт-амперной (вт.а.х.) характеристиками с.д. и характеристиками дислокаций, проявляющихся в виде объемных каналов утечки тока параллельно p – n -

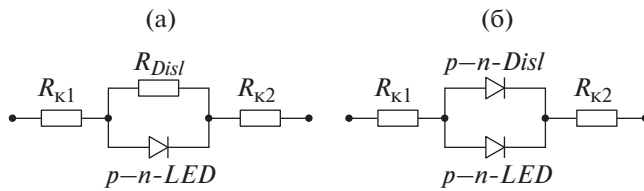


Рис. 1. Возможные схемы подключения дислокаций параллельно p - n -переходу с.д.: **а** — в виде омического сопротивления; **б** — в виде собственного p - n -перехода. R_{K1} , R_{K2} — сопротивление омических контактов с.д.; p - n -LED — p - n -переход с.д.; R_{Disl} — омическое сопротивление дислокаций; p - n -Disl — p - n -переход дислокаций.

переходу с.д., затрудняет прогнозирование работоспособности с.д. при воздействии различных внешних факторов и не позволяет оценить электрофизические характеристики дислокаций. Объемные каналы утечки тока, в отличие от каналов утечки тока по боковой поверхности кристалла с.д., обусловлены изменением электрофизических свойств облаков Коттрелла, формируемых вокруг дислокаций под воздействием внешних факторов [1–6].

Целью данной работы является исследование изменений в.а.х. и вт.а.х. светодиодов под влиянием объемных каналов утечки тока (дислокаций) путем физического моделирования их подключения параллельно p - n -переходу с.д.

Полученные таким образом данные позволяют описать изменения указанных выше характеристик с.д. при подключении объемных каналов утечки тока, возникновение которых обусловлено дислокациями с известными электрофизическими параметрами, и определять электрофизические свойства подключаемых объемных каналов утечки тока по наблюдаемым изменениям в.а.х. и вт.а.х.

2. МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ранее в [14] было показано, что дислокации могут быть подключены параллельно p - n -переходу с.д. в виде омического сопротивления или в виде собственного p - n -перехода. Соответствующие измерительные схемы показаны на рис. 1.

Объектами исследования выбраны промышленные с.д., изготовленные на основе двойных гетероструктур AlGaAs и предназначенные для эксплуатации в инфракрасном диапазоне длин волн. В [14] достаточно подробно описаны гетероструктура, технология изготовления и конструкция исследуемых в данной работе с.д. Для схемного физического моделирования подключения дислокаций параллельно с.д. в данной ра-

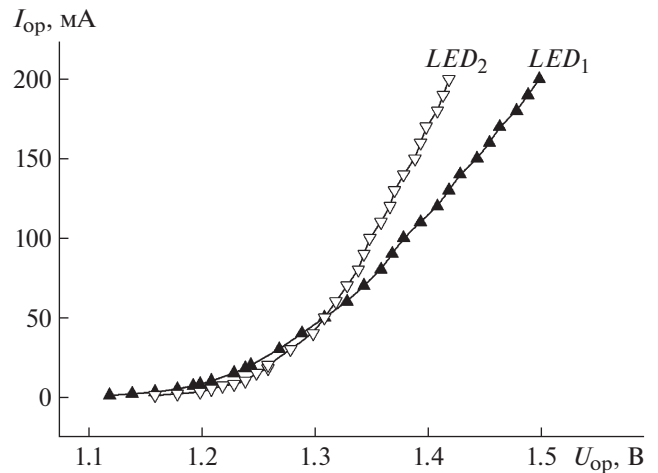


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики LED_1 и LED_2 . Точки — результаты измерений.

боте использовался базовый с.д. (далее LED_1), а для моделирования дислокаций — набор прецизионных омических сопротивлений R_{Disl} и второй с.д. (далее LED_2). Согласно рис. 1б, LED_2 использовался для моделирования p - n -Disl. Следует особо отметить, что контролируемые характеристики исследуемых с.д. не имели аномалий.

Основные характеристики с.д. (в.а.х. и вт.а.х.) измеряли на автоматизированном измерительном комплексе на основе фотометрического шара. Комплекс обеспечивал измерение прямого напряжения с.д. в интервале от 0 до 5 В в диапазоне прямых токов 0–500 мА с шагом не менее 1 мА. При этом погрешность задания прямого тока от установленного уровня составляла $\pm 3\%$, а погрешность измерения мощности излучения с.д. $\pm 5\%$.

Таким образом, комплекс позволял измерять в.а.х. и вт.а.х. с.д. в автоматическом режиме, а также проводить физическое моделирование, при этом LED_2 и R_{Disl} подключались вне фотометрического шара.

Рассмотрим основные электрофизические и светотехнические характеристики используемых при схемном моделировании с.д., а также определим основные параметры, которые будем использовать для описания изменения характеристик с.д. при подключении дислокаций.

На рис. 2 показаны в.а.х. LED_1 и LED_2 . Видно, что они отличаются друг от друга. Основные параметры, влияющие на изменение в.а.х., рассмотрим на примере LED_1 . Известно, что в области больших токов в.а.х. с.д. определяется падением напряжения на омических контактах [15]. Тогда из в.а.х. мы можем определить величину суммарного сопротивления омических контактов R_K (рис. 3).

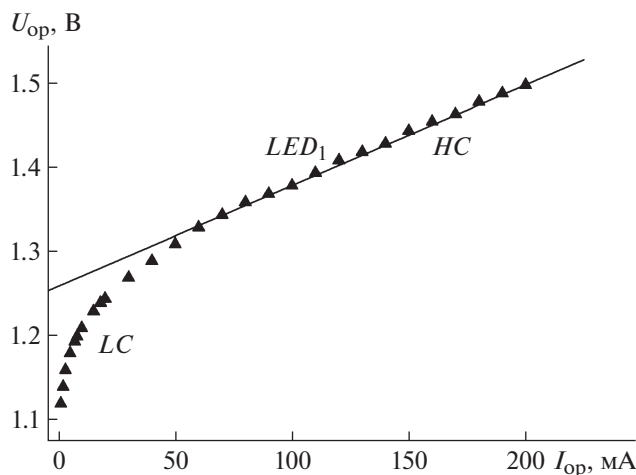


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика LED_1 : точки — результат измерений, линия — расчет по соотношению (1); LC — область низких токов, HC — область высоких токов.

Согласно рис. 3, на в.а.х. можно выделить две характерные области: LC — область низких токов и HC — область высоких токов, каждая из которых описывается собственной зависимостью $U_{op} = f(I_{op})$, где U_{op} — прямое напряжение с.д. при заданном рабочем токе I_{op} . В области HC данная зависимость определяется соотношением

$$U_{op} = U_0 + R_k I_{op}, \quad (1)$$

где $R_k = R_{k1} + R_{k2}$ — суммарное сопротивление омических контактов с.д.; $U_0 = 1.26$ В — коэффициент пропорциональности, характеризующий p – n -переход с.д.

Представляет интерес определить границу между выделенными областями. Это необходимо, в частности, по следующей причине. Изменение сопротивления омических контактов должно приводить к сдвигу этой границы точно так же, как и изменение характеристик p – n -перехода с.д. В свою очередь, различные внешние воздействия могут приводить к изменению как сопротивления омических контактов, так и характеристик p – n -перехода с.д.

Рассмотрим в.а.х. LED_1 в двойных логарифмических координатах (рис. 4). Такое представление в.а.х. с.д. позволяет достаточно четко определить граничный ток I_{LH} и соответственно граничное напряжение U_{LH} между выделенными областями (здесь и далее все численные значения величин будем приводить с точностью до третьего знака). Следует отметить, что с ростом сопротивления омических контактов будет наблюдаться сдвиг данной границы в область более высоких напряжений питания с.д.

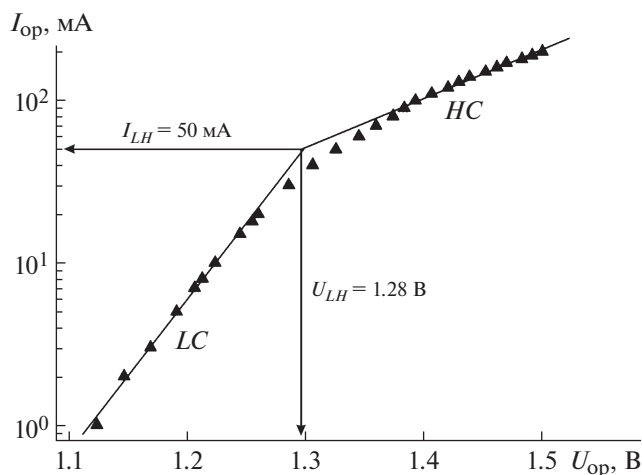


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика LED_1 : точки — результат измерений, линии — экстраполяция областей LC и HC ; I_{LH} , U_{LH} — граничные значения тока и напряжения между выделенными областями.

Далее рассмотрим вт.а.х. (рис. 5) исследуемых с.д. Согласно рис. 5, вт.а.х. LED_1 и LED_2 также различаются, но на них нельзя в явном виде выделить области LC и HC . Все наблюдаемые различия практически полностью можно объяснить погрешностью измерения анализируемых параметров. Отсутствие на вт.а.х. признаков явного разделения областей LC и HC наиболее вероятно обусловлено тем, что наличие области HC на в.а.х. однозначно определяется сопротивлением омических контактов (см. рис. 3). Кроме того, наличие области HC может быть связано и с увеличением температуры активного слоя с.д. по мере роста рабочего тока в процессе проведения измерений его характеристик.

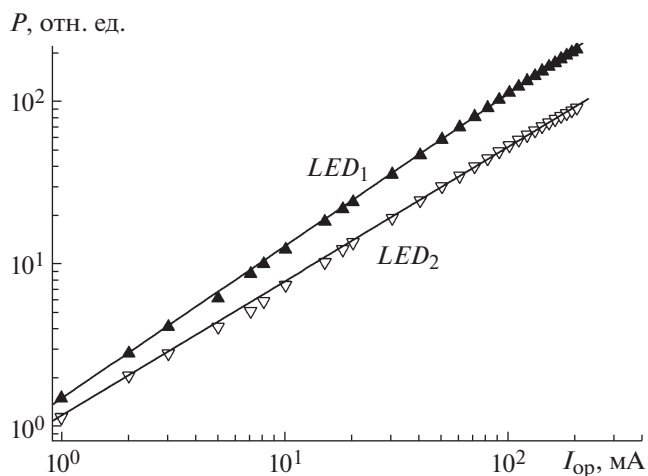


Рис. 5. Ватт-амперные характеристики LED_1 и LED_2 в двойных логарифмических координатах.

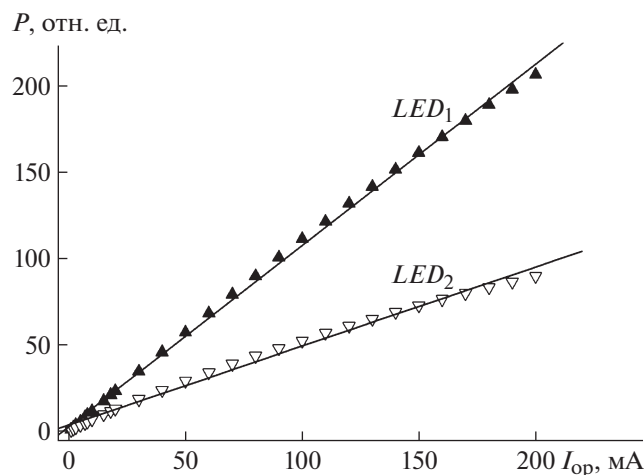


Рис. 6. Ватт-амперные характеристики LED_1 и LED_2 в линейных координатах.

В свою очередь рост температуры активного слоя может быть следствием как увеличения сопротивления омических контактов, так и подключения дислокаций [16]. При этом известно, что мощность излучения с.д. достаточно сильно зависит от температуры [17].

В частности, в [18] было показано, что для с.д. на основе GaP области LC и HC можно выделить на в.а.х. до проведения внешних воздействий на с.д. Зависимость мощности излучения с.д. от рабочего тока в данном случае можно описать следующим соотношением

$$P = AI_{оп}^{\alpha}, \quad (2)$$

где A , α – коэффициенты пропорциональности, характерные для исследуемого с.д. Отметим, что показатель степени α может быть различным для областей LC и HC [18] и изменяться при воздействии на с.д. различных внешних факторов.

С некоторым приближением в.а.х. используемых при моделировании с.д. можно описать и линейной функцией мощности излучения от рабочего тока, как это показано на рис. 6, т.е. принять коэффициент $\alpha = 1$ в соотношении (2).

Таким образом, выше достаточно подробно рассмотрены основные электрофизические и светотехнические характеристики с.д., которые будут использованы при физическом моделировании. Подобный анализ можно выполнить и для ватт-вольтовой характеристики с.д., которая иногда используется для описания свойств с.д.

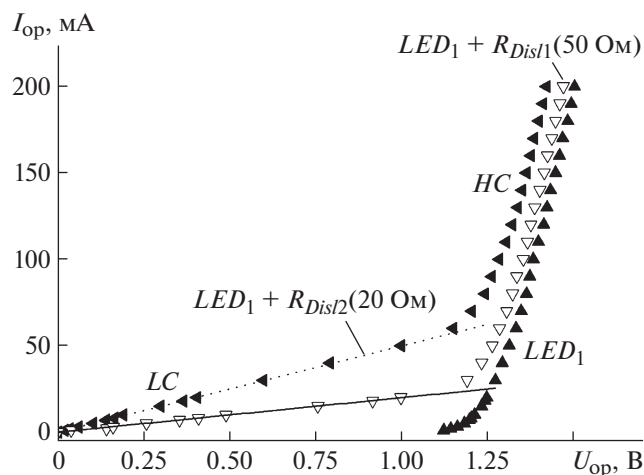


Рис. 7. Изменение в.а.х. с.д. при подключении к LED_1 дислокаций в виде омического сопротивления различной величины.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Подключение дислокаций в виде омического сопротивления

Рассмотрим подключение к p – n -переходу с.д. объемных каналов утечки тока (дислокаций) в виде параллельного омического сопротивления по схеме, которая показана на рис. 1а. Для данного случая физического моделирования изменения в.а.х. при различных значениях омического сопротивления дислокаций показаны на рис. 7. Таким образом, фактически будем рассматривать изменение в.а.х. $LED_1 + R_{Disl}$ в сравнении с в.а.х. LED_1 .

Согласно рис. 7, подключение дислокаций в виде параллельного омического сопротивления существенно изменяет форму в.а.х. с.д. Это соответствует данным, наблюдаемым ранее для диодов с барьером Шоттки [7] и для с.д. в работе [14].

В нашем случае на в.а.х. явно можно выделить участки тока LC и HC , граница между которыми сдвигается в область более низких рабочих напряжений вследствие снижения сопротивления $LED_1 + R_{Disl}$ в области LC при неизменном сопротивлении омических контактов с.д. Согласно рис. 7, в случае $LED_1 + R_{Disl}$ участок LC в.а.х. очень хорошо определяется омическим сопротивлением подключаемых дислокаций, а область HC описывается суммарным омическим сопротивлением с.д. и дислокаций и собственным значением коэффициента пропорциональности U_0 (1):

$$U_{оп} = U_0 + \left(\frac{R_k + R_{Disl}}{R_k R_{Disl}} \right) I_{оп LED}. \quad (3)$$

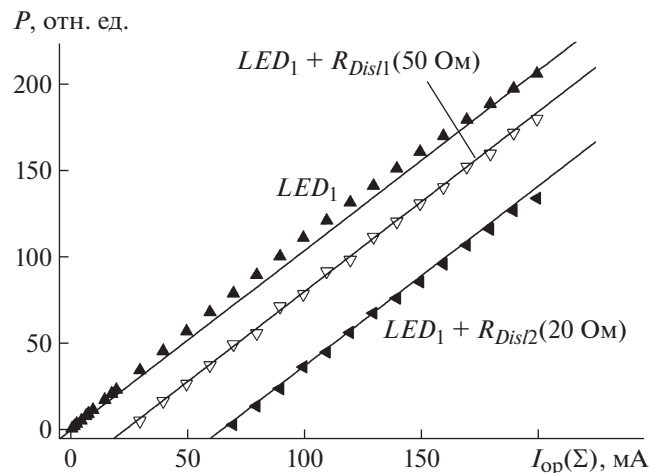


Рис. 8. Ватт-амперные характеристики с.д. при подключении к LED_1 дислокаций в виде омического сопротивления в линейных координатах. Точки — результат моделирования; линии — расчет по (4).

Величина суммарного рабочего тока $I(\Sigma)$ с.д. в этом случае может быть описана следующим соотношением

$$I(\Sigma) = I_{op\ LED} + \frac{U_{op}}{R_{Disl}}. \quad (4)$$

Таким образом, если в результате внешнего воздействия (ионизирующего излучения, длительной эксплуатации и т.д.) наблюдается подобное рассмотренному случаю изменение формы в.а.х. с.д., то его следует объяснять параллельным подключением дислокаций в виде омического сопротивления. При этом путем линейной экстраполяции участка LC на измеряемой в.а.х. (см. рис. 7) можно определить омическое сопротивление подключаемых дислокаций, а используя линейную экстраполяцию в.а.х. в области HC , — суммарное омическое сопротивление с.д.

Рассмотрим изменение вт.а.х. с.д. при подключении дислокаций в виде омического сопротивления (рис. 8).

Согласно рис. 8, подключение дислокаций в виде омического сопротивления параллельно $p-n$ -переходу с.д. приводит к сдвигу вт.а.х. на величину ΔI_{Disl} в область более высоких рабочих токов, при этом наклон вт.а.х. остается практически без изменений. В общем случае наблюдаемый сдвиг вт.а.х. можно описать линейной функцией

$$P = AI_{op} + \Delta I_{Disl}. \quad (5)$$

Величина ΔI_{Disl} зависит от омического сопротивления дислокаций, как показано на рис. 9.

Подключение дислокаций в виде омического сопротивления параллельно $p-n$ -переходу с.д.

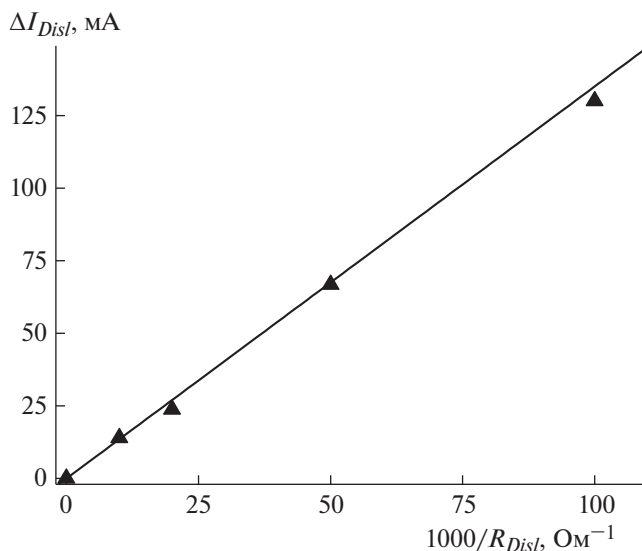


Рис. 9. Зависимость сдвига по току вт.а.х. ΔI_{Disl} от сопротивления дислокаций R_{Disl} .

сильно меняет форму вт.а.х., построенную в двойных логарифмических координатах (рис. 10).

На рис. 8 вт.а.х. LED_1 описывается соотношением (2), а вт.а.х. $LED_1 + R_{Disl1}$ и $LED_1 + R_{Disl2}$ — соотношением (4). В данном случае наблюдается сдвиг вт.а.х. с.д. в область более высоких рабочих токов, т.е. без дополнительного анализа в.а.х. можно выделить области низких LC и высоких HC токов. Однако такое выделение вряд ли будет справедливым, поскольку наблюдаемое в данном случае изменение вт.а.х. обусловлено не зависимостью мощности излучения с.д. от плотности

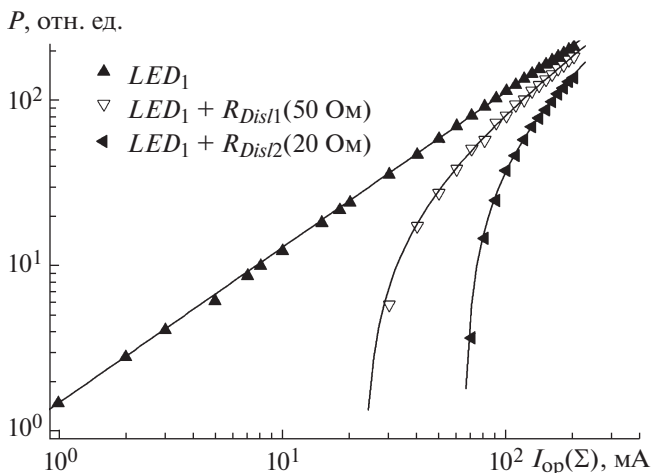


Рис. 10. Ватт-амперные характеристики с.д. в двойных логарифмических координатах при подключении к LED_1 дислокаций в виде омического сопротивления.

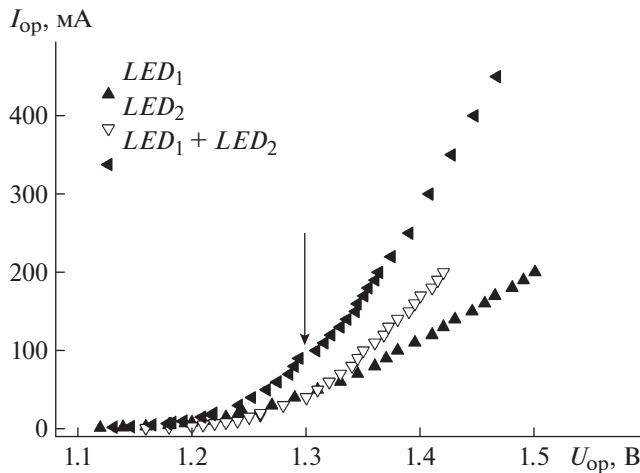


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики с.д., полученные при подключении к LED_1 дислокаций с собственным $p-n$ -переходом.

рабочего тока, а соответствующим подключением дислокаций.

Таким образом, в результате схемного физического моделирования установлено, что подключение дислокаций в виде омического сопротивления параллельно $p-n$ -переходу с.д. существенно изменяет его в.а.х. и вт.а.х. Анализ изменений в.а.х. позволяет определить омическое сопротивление подключаемых дислокаций. В свою очередь наблюдается сдвиг вт.а.х. с.д. в область более высоких рабочих токов, при этом величина сдвига изменяется пропорционально проводимости дислокаций (см. рис. 9). Установлены основные закономерности, которые могут быть использованы для количественного анализа изменений в.а.х. и вт.а.х. с.д. при подключении дислокаций в виде омического сопротивления параллельно его $p-n$ -переходу.

3.2. Подключение дислокаций с собственным $p-n$ -переходом

Рассмотрим результаты схемного физического моделирования подключения дислокаций с собственным $p-n$ -переходом параллельно $p-n$ -переходу с.д. (см. рис. 16). При моделировании фактически измеряли суммарную в.а.х. двух с.д. (LED_1 и LED_2), включенных параллельно друг другу, но вт.а.х. — только для LED_1 . На рис. 11 представлены в.а.х. с.д., полученные в результате моделирования.

На в.а.х., представленных на рис. 11, не наблюдается каких-либо аномалий по внешнему виду, можно только отметить неоднородность, которая отмечена вертикальной стрелкой. Однако на в.а.х. светодиода, построенной в двойных логарифмических координатах, можно выделить области низких LC и высоких HC токов (см. рис. 4).

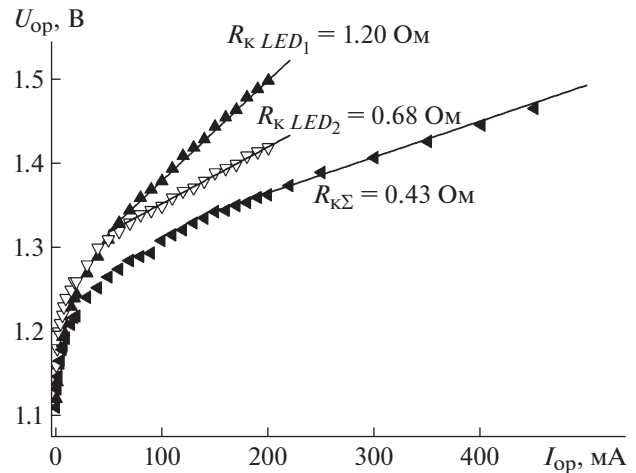


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики LED_1 , LED_2 и суммарная в.а.х. двух с.д. $LED_1 + LED_2$.

Вольт-амперные характеристики с.д. в области HC определяются суммарным сопротивлением омических контактов и суммарным омическим сопротивлением LED_1 и LED_2 , как это показано на рис. 12. В этом случае в.а.х. с.д. описывается соотношением (1), а сопротивление омических контактов определяет наклон в.а.х. в области HC .

Таким образом, подключение дислокаций с собственным $p-n$ -переходом параллельно с.д. может не приводить к появлению явных аномалий на суммарной в.а.х. Наблюдается только более высокое значение рабочего тока при идентичном рабочем напряжении. Отметим, что при су-

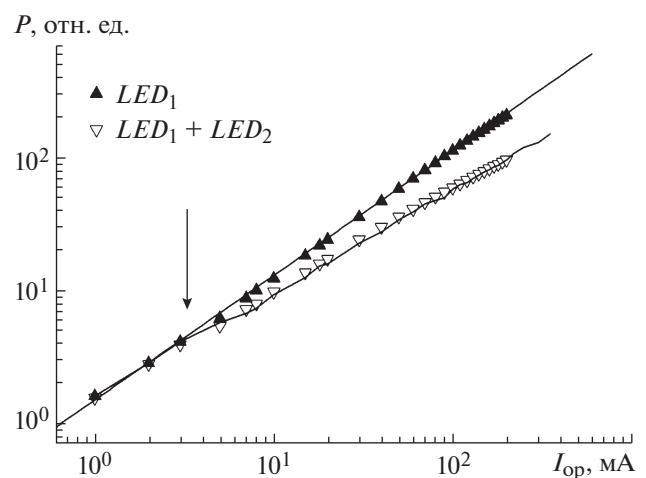


Рис. 13. Ватт-амперные характеристики LED_1 и суммарная вт.а.х. $LED_1 + LED_2$. Точки — результаты измерений; линии — расчет по соотношениям (2) и (5) соответственно. Вертикальной стрелкой показан момент подключения дислокаций.

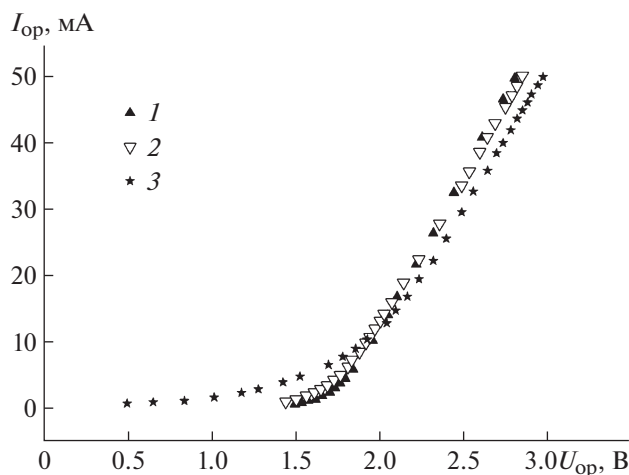


Рис. 14. Изменение в.а.х. светодиода после его облучения электронами: 1 – в.а.х. с.д. до облучения; 2, 3 – после облучения электронами с флюенсом $F_e = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (2) и $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3). Точки – результаты исследований из работы [18].

существенном различии в.а.х. дислокаций и в.а.х. с.д. это ожидаемо.

Рассмотрим изменение вт.а.х. светодиода при подключении дислокаций с собственным $p-n$ -переходом параллельно с.д. (рис. 13). В данном случае суммарную вт.а.х. $LED_1 + LED_2$ можно описать соотношением

$$P_{LED_1+LED_2} = A[I_{op}(LED_1) - I_{op}(LED_2)]^\alpha. \quad (6)$$

Снижение мощности излучения с.д. регистрируется с некоторого порогового тока (показан вертикальной стрелкой на рис. 13), величина которого определяется электрофизическими свойствами подключаемых дислокаций. Анализ рис. 13 показывает, что результаты расчета мощности излучения с.д. по соотношениям (2) и (6) очень хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. Таким образом, подключение дислокаций с собственным $p-n$ -переходом параллельно с.д. приводит к изменению вт.а.х. (см. рис. 13).

Суммируя изложенные выше результаты физического моделирования, отметим, что подключение дислокаций в виде омического сопротивления приводит к существенному искажению в.а.х. с.д. – наблюдается сдвиг в.а.х. в область более высоких рабочих токов. Величина этого сдвига прямо пропорциональна проводимости подключаемых дислокаций. В свою очередь, подключение дислокаций с собственным $p-n$ -переходом может и не вносить заметного изменения в форму в.а.х. с.д., но при этом вт.а.х. показывают снижение мощности излучения с.д. с некоторого рабочего тока, который определяется электрофизическими свойствами подключаемых дислокаций и с.д.

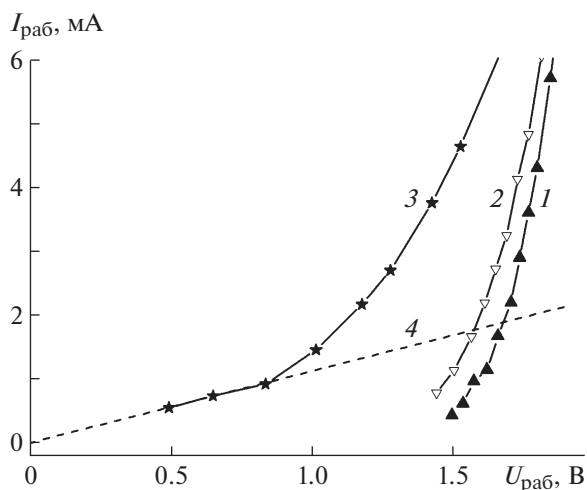


Рис. 15. Изменение в.а.х. светодиода в области LC при облучении с.д. электронами: 1 – в.а.х. с.д. до облучения; 2, 3 – после облучения электронами с флюенсом $F_e = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (2) и $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (3); 4 – в.а.х. дислокаций ($R_{Disl} = 892 \text{ Ом}$). Точки – результаты исследований из работы [18].

Установлены соотношения, использование которых позволяет по электрофизическим характеристикам подключаемых дислокаций рассчитать ожидаемое изменение электрофизических и светотехнических характеристик с.д. и, наоборот, оценить электрофизические характеристики дислокаций по изменению в.а.х. и вт.а.х. с.д. при внешних воздействиях.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сопоставим изложенные выше результаты физического моделирования с известными литературными данными. В работе [18] представлены результаты исследования стойкости красных светодиодов на основе полупроводниковых структур GaP (Zn, O) к облучению электронами с энергией $E_e = 4 \text{ МэВ}$. На рис. 14 приведены измеренные в этой работе в.а.х. с.д. Анализ их внешнего вида позволяет предположить подключение дислокаций в виде омического сопротивления параллельно $p-n$ -переходу с.д. в результате облучения последнего электронами (сравни с рис. 7). Рассмотрим полученные в.а.х. с.д. в области низких токов LC (рис. 15), поскольку именно в этой области проявляются подключаемые дислокации в явном виде.

Внимательный анализ в.а.х. с.д. до его облучения и после (кривые 1 и 2 на рис. 15) позволяет предположить, что дислокации были подключены еще до облучения с.д., а после облучения электронами наблюдается снижение сопротивления

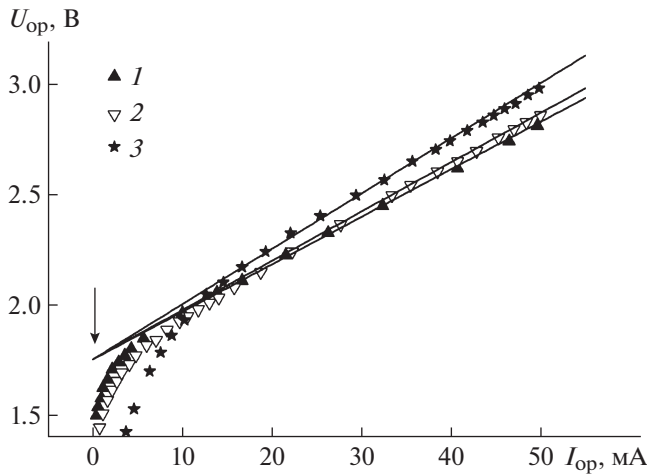


Рис. 16. Изменение в.а.х. в области *HC* при облучении с.д. электронами и при различных значениях омического сопротивления R_k с.д.: 1 – $R_k = 2.15$ Ом, $F_e = 0$ см $^{-2}$; 2 – $R_k = 2.23$ Ом, $F_e = 2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$; 3 – $R_k = 2.50$ Ом, $F_e = 8 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$. Точки – результаты измерений из работы [18]. Стрелкой показано общее рабочее напряжение U_0 .

дислокаций за счет роста облаков Коттрелла вследствие появления радиационных дефектов. Таким образом, наблюдаемое изменение в.а.х. с.д. в области *LC* после его облучения электронами достаточно хорошо описывается подключением дислокаций в виде омического сопротивления параллельно *p-n*-переходу с.д. При этом можно утверждать, что с ростом флюенса электронов сопротивление дислокаций снижается.

Рассмотрим изменение в.а.х. в области высоких токов *HC* при облучении с.д. электронами с различным флюенсом и при разном омическом сопротивлении с.д. (рис. 16). В данном случае омическое сопротивление с.д. описывается соотношением (1) при постоянном значении U_0 для всех рассматриваемых в.а.х. Идентичность значения U_0 свидетельствует о том, что дислокации были подключены еще до облучения с.д. Результаты, представленные на рис. 16, также позволяют сделать вывод о том, что с ростом флюенса электронов возрастает сопротивление омических контактов. В этом случае можно определить зависимость, которая будет описывать изменение сопротивления омических контактов с ростом флюенса электронов (рис. 17).

Таким образом, полученное в работе [19] изменение в.а.х. с.д. при его облучении электронами вполне может быть обусловлено одновременным действием двух механизмов деградации с.д.:

- подключением параллельно *p-n*-переходу с.д. дислокаций в виде омического сопротивле-

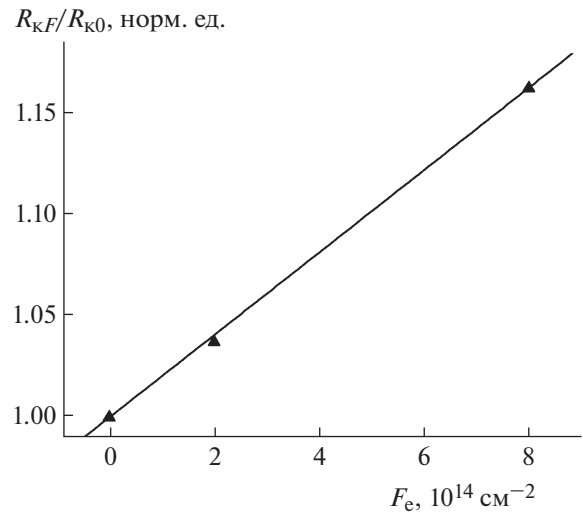


Рис. 17. Изменение сопротивления омических контактов с.д. при его облучении электронами.

ния, величина которого снижается с ростом флюенса электронов;

- увеличением сопротивления омических контактов с ростом флюенса электронов.

В работе [20] представлены результаты исследования деградационных процессов в с.д. на основе гетероструктур AlGaAs в процессе их эксплуатации. Воздействие факторов эксплуатации (повышенного рабочего тока, повышенной температуры и длительного времени наработки) моделировали пропусканием тока, существенно превышающего рабочий ток, при повышенной окружающей температуре. По результатам исследова-

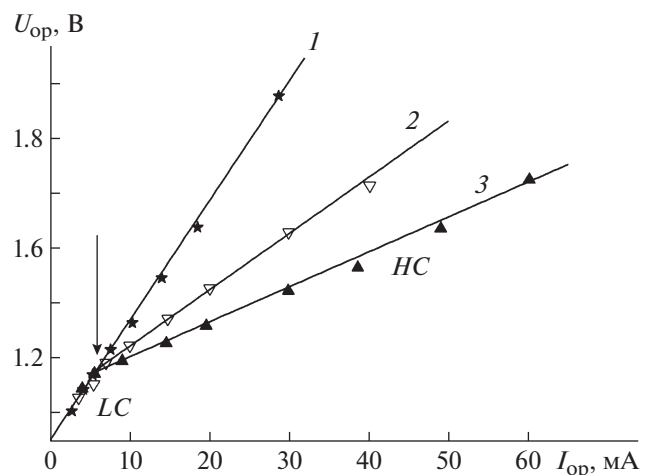


Рис. 18. Изменение в.а.х. с.д. в процессе наработки: 1 – 0 ч ($R_{k0} = 21.9$ Ом); 2 – 850 ч ($R_{k1} = 10.3$ Ом); 3 – 4000 ч ($R_{k3} = 6.4$ Ом). Стрелкой показано общее рабочее напряжение U_0 .

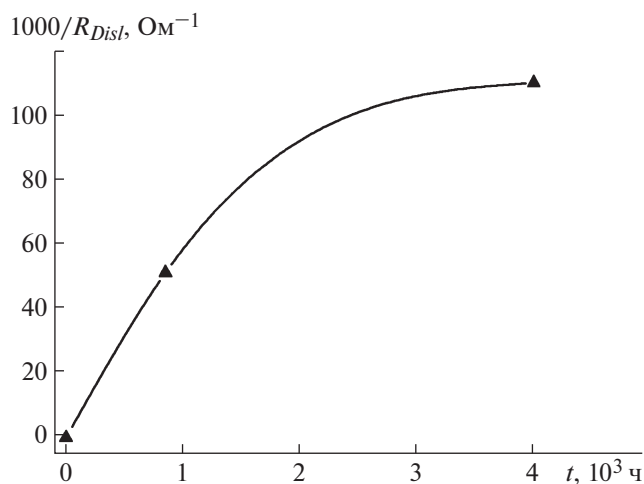


Рис. 19. Изменение проводимости подключаемых к с.д. дислокаций в зависимости от времени наработки с.д.

дований было установлено существенное изменение формы вольт-амперной и люмен-амперной (аналог вт.а.х.) характеристик с.д.

Анализ характерных изменений в.а.х. с.д., полученных в работе [20], позволяет предполагать, что в процессе наработки параллельно $p-n$ -переходу с.д. подключаются дислокации, которые имеют собственный $p-n$ -переход и характеризуются линейной (омической) в.а.х.

На рис. 18 показано изменение омического сопротивления с.д. в процессе эксплуатации вследствие подключения дислокаций.

Согласно рис. 18, подключение дислокаций происходит при одном и том же значении рабочего напряжения (рабочего тока). Это позволяет сделать вывод о неизменности U_0 . С ростом продолжительности наработки повышается проводимость дислокаций. Имеющиеся экспериментальные данные [20] позволяют определить зависимость проводимости подключаемых дислокаций от времени наработки (рис. 19).

Следует отметить, что установленное в [20] изменение люкс-амперной характеристики по внешнему виду полностью соответствует изменению вт.а.х. с.д. в случае параллельного подключения дислокаций в виде омического сопротивления, которое получено в данной работе (см. рис. 10).

Таким образом, сопоставление результатов физического моделирования подключения дислокаций параллельно $p-n$ -переходу с.д. с имеющимися экспериментальными результатами по исследованию воздействия различных внешних факторов (ионизирующего излучения, длительной эксплуатации) показало полную тождественность установленных соотношений, которые описывают наблюдаемые при этом изменения

электрофизических и светотехнических характеристик с.д.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика физического моделирования подключения объемных каналов утечки тока (дислокаций) параллельно $p-n$ -переходу с.д.

2. На основе физического моделирования установлены соотношения, которые позволяют определять изменения электрофизических и светотехнических характеристик с.д. в результате воздействия различных внешних факторов (ионизирующего излучения, длительной эксплуатации и т.д.) и электрофизические параметры дислокаций при их подключении по наблюдаемым изменениям характеристик с.д.

3. На основе известных литературных данных показана эффективность использования установленных соотношений для анализа характеристик с.д., подвергнутых различным внешним воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bardsley W.T. The Electrical Effects of Dislocations in Semiconductors, in Progress in Semiconductors / Ed. by A.F. Gibson. N.Y.: Wiley, 1960.
2. Шикин В.Б., Шикина Ю.В. // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 8. С. 887.
3. Мамаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974.
4. Yuen-Yee Wong, Edward Yi Chang, Tsung-Hsi Yang, Jet-Rung Chang, Jui-Tai Ku, Mantu K. Hudait, Wu-Ching Chou, Micheal Chen, Kung-Liang Lin // Journal of the Electrochemical Society. 2010. V. 157. № 7. P. 746. <https://doi.org/10.1149/1.3392365>
5. Yonenaga I., Ohno Y., Edagava K. // J. of Crystal Growth. 2014. V. 403. P. 72. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.06.021>
6. Shigeyoshi Usami, Yuto Ando, Atsushi Tanaka, Kentaro Nagamatsu, Manato Deki, Maki Kushimoto, Shugo Nitta, Yoshio Honda, Hiroshi Amano, Yoshihiro Sugawara, Yong-Zhao Yao, Yukari Ishikawa // Appl. Phys. Letters. 2018. V. 112. № 18. P. 182106. <https://doi.org/10.1063/1.5024704>
7. Takahashi K. // Japanese Journal of Applied Physics. 1980. V. 19. № 4. P. 773.
8. Bergh A.A., Dean P.J. Light-emitting diodes. Oxford: Clarendon Press, 1976.
9. Шуберт Ф. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008.
10. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников. М.: Металлургия, 1985.
11. Chin A.K., Keramidas V.G., Johnston W.D., Mahajan S., Roccasecca D.D. // Journal of Applied Physics. 1980. V. 51. № 2. P. 978. <https://doi.org/10.1063/1.327678>

12. *Li D.S., Chen H., Yu H.B., Jia H.Q., Huang Q., Zhou J.M.* // Journal of Applied Physics. 2004. V. 96. № 2. P. 1111. <https://doi.org/10.1063/1.1763234>
13. *Schubert M.F., Chhajed S., Kim J.K., Schubert E.F., Koleske D.D., Crawford M.H., Lee S.R., Fischer A.J., Thaler G., Banas M.A.* // Appl. Phys. Letters. 2007. V. 91. № 23. P. 231114. <https://doi.org/10.1063/1.2822442>
14. *Gradoboev A.V., Orlova K.N., Simonova A.V.* // Microelectronics Reliability. 2016. V. 65. P. 55. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.143>
15. *Градобоев А.В., Симонова А.В., Орлова К.Н.* // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.8>
16. *Sachenko A.V., Belyaev A.V., Bobyl A.V., Boltovets N.S.* // Semiconductors. 2012. V. 46. № 3. P. 334. <https://doi.org/10.1134/S1063782612030177>
17. *Ohno Y.* // Fifth Symposium Optics in Industry. (Santiago De Queretaro, Mexico, 2005) 2006. V. 6046. P. 604625. <https://doi.org/10.1117/12.674617>
18. *Gradoboev A.V., Orlova K.N., Simonova A.V.* // Materials Science Forum Scientific Journal. 2019. V. 270. P. 88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.88>
19. *Гонтарук А.М., Конорева О.В., Литовченко П.Г., Малый Е.В., Петренко И.В., Пинковская М.Б., Тартачник В.П., Шлапацкая В.В.* // ВАНТ. Физика радиационных повреждений и явлений в твердых телах. 2015. № 5. С. 28.
20. *Ирха В.И.* // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2010. № 1. С. 95.