УДК 621.383.52:539.12.04

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ФОТОДИОДОВ НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»

Ю.А. Кабальнов, А.Н. Труфанов, С.В. Оболенский

*Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»
603950, г. Нижний Новгород, БОКС №486*

Представлены результаты разработки конструкции и технологии изготовления фотодиодов на структурах «кремний на сапфире». Показано, что фотодиоды сохраняют свои характеристики при уровнях ионизирующего излучения, соответствующих требованиям к радиационно стойким устройствам систем управления и связи космического, военного и другого специального назначения.

Ключевые слова: фотодиоды, структуры «кремний на сапфире», ионизирующее излучение, радиационная стойкость

Сведения об авторах: Кабальнов Юрий Аркадьевич, к.т.н., kabalnov@niiis.nnov.ru; Оболенский Сергей Владимирович, д.т.н., obolensk7@gmail.com; Труфанов Алексей Николаевич, к.т.н., atrufanov@niiis.nnov.ru

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF RADIATION-RESISTANT PHOTODIODES BASED ON SILICON-ON-SAPPHIRE

Yu.A. Kabalnov, A.N. Trufanov, S.V. Obolenskiy

Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics» «Yu.E. Sedakov Research Institute of Measuring Systems» 603950, Nizhniy Novgorod, box №486

In this paper the results of developing of silicon-on-sapphire photodiodes` design and fabrication method are presented. It is shown that photodiodes retain their characteristics in ionizing radiation conditions that meet the requirements for radiation-resistant devices of control and communication systems for space, military and other special applications.

Keywords: photodiodes, silicon-on-sapphire, ionizing radiation, radiation-resistance

Authors: Kabalnov Yury Arkadievich, Ph.D., kabalnov@niiis.nnov.ru; Obolenskiy Sergey Vladimirovich, Sc.D, obolensk7@gmail.com; Trufanov Aleksey Nikolaevich, Ph.D., atrufanov@niiis.nnov.ru

Введение

Полупроводниковые фотодиоды (ФД) на монокристаллическом кремнии широко используются в качестве приёмников излучения, рассчитанных на спектральный диапазон 0.4-1.1 мкм. Монокристаллический кремний отличается совершенной структурой и обеспечивает возможность изготовления надёжных в эксплуатации фотоприёмников со стабильно высокими фотоэлектрическими характеристиками [1]. Вместе с тем использование их в бортовой аппаратуре ограничивается низкой стойкостью к воздействию γ -нейтронного излучения [2, 3]. Большая проникающая способность γ -нейтронного излучения обуславливает формирование в структуре диода кластеров радиационных дефектов, что приводит к значительному увеличению скорости рекомбинации носителей заряда и, как следствие, отказам функционирования. Конструктивные изменения, связанные с типом полупроводникового материала, оптимизацией профилей легирования и площади p - n переходов, не позволяют добиться снижения скорости рекомбинации и увеличения фоточувствительности, т.к. в стандартных фотодиодах на кремнии не ограничиваются растекание заряда и его рекомбинация в объёме подложки. Предложенный авторами [4] способ использования структур «кремний на сапфире» (КНС) с целью ограничения объёма области сбора и рекомбинации носителей заряда позволил снизить деградацию характеристик и добиться высоких уровней стойкости фотодиодов при γ -нейтронном облучении.

Структуры КНС с толщиной гетероэпитаксиальных слоёв кремния 0.3-0.6 мкм

используются для изготовления радиационно стойких полевых транзисторов и интегральных схем на их основе. Основное преимущество структур КНС связано с возможностью формирования транзисторов в изолированных областях кремния, что исключает возникновение тиристорных эффектов и сбои функционирования при импульсном и стационарном γ -нейтронном облучении. Задача изготовления фотодиодов с требуемой величиной токовой чувствительности более 0.3 А/Вт на КНС структурах с субмикронными гетероэпитаксиальными плёнками кремния невыполнима ввиду ограниченных размеров обеднённых областей p - n переходов. В настоящей работе представлены результаты разработки радиационно стойких фотодиодов на структурах КНС с толщиной гетероэпитаксиальных плёнок кремния ~ 5 мкм, описаны их конструкция, технология изготовления и достигнутые характеристики.

Конструкция фотодиодов

Фотодиоды проектировались как преобразователи постоянного и импульсно-периодического оптического излучения длиной волны 0.63 мкм в электрические сигналы. При проведении испытаний допустимый диапазон длин волн оптического излучения составлял 0.625-0.640 мкм. Для ФД предполагался фотогальванический и фотодиодный режимы работы при напряжении питания в фотодиодном режиме не более 5 В. Следует отметить, что измеренные значения величины токовой чувствительности при различных режимах работы ФД отличались незначительно – менее 7 процентов. Квантовая

эффективность фотодиодов η , приближённо равная [1]

$$\eta = (1 - R) [1 - \exp(-\alpha \cdot \omega)],$$

определяется коэффициентом отражения излучения от фоточувствительной площадки R , коэффициентом поглощения излучения α и величиной области поглощения ω . Для снижения коэффициента отражения излучения обычно используются антиотражающие покрытия. Размер области поглощения ω обратно пропорционален величине коэффициента оптического поглощения. Спектры оптического поглощения в кремнии в зависимости от длины волны излучения немонотонны, т.к. наряду с прямыми оптическими переходами при увеличении длины волны в фотовозбуждении участвуют фононы. При длине волны оптического излучения 0.63 мкм при нормальных климатических условиях ω оценивается как ~ 3 мкм, но так как ФД должны быть работоспособны и в области отрицательных температур, ω возрастает до ~ 4 мкм. Следует учитывать прозрачность сапфира для излучения с длиной волны 0.63 мкм, что даёт возможность довести парциальную квантовую эффективность $\eta/(1 - R)$ до максимальных значений на отражённом лазерном луче.

Исследования слоёв КНС с помощью рентгеновской и электронной спектроскопии свидетельствуют [5, 6], что гетероэпитаксиальные плёнки кремния на сапфире не обладают столь совершенной кристаллической структурой, как объёмный кремний. В плёнках кремния на сапфире повышена концентрация дефектов, таких как

дислокации несоответствия, микродвойники и дефекты упаковки. Снизить их концентрацию оптимизацией режимов эпитаксиального роста и варьированием направления среза сапфира не удаётся из-за несоответствия параметров кристаллических решёток кремния и сапфира. Возникающие механические напряжения на границе раздела релаксируют с образованием сетки дислокаций. При удалении от границы раздела концентрация дефектов снижается. Выполненные в работе измерения величины темнового тока КНС фотодиодов показали, что данные характеристики уступают фотодиодам на кремнии, однако токовая чувствительность имеет величину, сопоставимую с кремниевыми фотодиодами, что обуславливает возможность их использования в аппаратуре. Проведённые в работах [5, 6] исследования свидетельствуют, что структура приграничных слоёв сапфира в процессе эпитаксиального роста остаётся совершенной и может служить эффективной отражающей поверхностью для носителей в момент детектирования оптического излучения, что в нашем случае важно для обеспечения радиационной стойкости фотодиодов.

Фотодиоды разрабатывались для использования в диодных матрицах фотоприёмных устройств. Диодные матрицы комплектовались диодами в корпусах минимальных размеров, следовательно, размеры кристаллов должны были соответствовать посадочному месту корпуса (2.1x2.1 мм). Разработаны два типа фотодиодов: одноэлементные, содержащие один фоточувствительный элемент (ФЧЭ),

и двухэлементные, содержащие два идентичных ФЧЭ на одном кристалле, разделённые межэлементным зазором. Идентичность двух ФЧЭ двухэлементного ФД подтверждают результаты измерений их параметров. Величина коэффициента фотоэлектрической связи двух ФЧЭ не превышала 2 %, поэтому на основе двухэлементного ФД могут быть реализованы схемы сравнения, исключающие ложное срабатывание устройств, обусловленное ростом ионизационных токов при воздействии ионизирующего излучения.

Разработку топологии фотодиодов с микронными проектными нормами выполняли в топологическом редакторе САПР Cadence. Для повышения токовой чувствительности fotocувствительные области диодов формировались как параллельные соединения элементарных диодов малой площади. Конструктивно области анода и катода фотодиодов выполняли в виде встречно-штыревой структуры с размером fotocувствительной области $1.4 \times 1.4 \text{ мм}^2$ для одноэлемент-

ных диодов и $0.4 \times 1.4 \text{ мм}^2$ для каждого элемента двухэлементных диодов. Расстояние между p^+ -анодом и n^+ -катодом составляло $\sim 20 \text{ мкм}$, что сопоставимо с диффузионной длиной носителей заряда в кремнии. Для оптимизации токовой чувствительности были изготовлены различные топологические варианты кристаллов с количеством элементарных диодов от 17 до 65 с сохранением общей площади фотодиода. Токовая чувствительность при увеличении плотности упаковки кристаллов за счёт элементарных диодов не увеличивалась из-за роста площади экранирования областями металлизации. Топология фотодиодов с одним и двумя ФЧЭ (рис. 1) была сформирована из 20 элементарных диодов. Контактные площадки были выведены за fotocувствительные области и располагались симметрично относительно центра кристалла. Важной задачей при корпусировании было обеспечение отклонения центра кристалла относительно корпуса на величину не более 150 мкм . Для контроля качества выполнения технологических

Рис. 1

Фотодиоды с одной и двумя fotocувствительными областями

операций в состав топологии на линии реза была введена тестовая линейка с набором тестовых элементов.

Технология изготовления

Кристаллы фотодиодов изготавливали по планарной технологии с использованием групповой обработки пластин. Применялись выращенные из газовой фазы гетероэпитаксиальные структуры кремния n -типа проводимости с ориентацией (100) на подложках из монокристаллического сапфира ориентации (1012). По параметру токовая чувствительность с использованием тестовых структур фотодиодов была определена оптимальная концентрация примеси в плёнках кремния $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Снижение концентрации примеси приводило к снижению токовой чувствительности. При выращивании гетероэпитаксиальных слоёв кремния толщиной 5 мкм возникли трудности, связанные с высокой кривизной структур, обусловленной различными термическими коэффициентами линейного расширения кремния и сапфира. Нанесением на обратную сторону сапфира плёнок поликристаллического кремния удалось снизить прогиб структур со 150 мкм до стандартных для КНС ~ 40 мкм. Из-за трудностей формирования на КНС структурах с 5-мкм плёнками глубоких с небольшими линейными размерами меток совмещения для проекционной фотолитографии использовалась контактная литография. Для снижения коэффициента фотоэлектрической связи между элементами диодов по периметру их фоточувствительных областей вытравливались канавки на всю глубину эпитаксиального

слоя. Глубокое травление канавок выполняли на установке плазмохимического травления по маске фоторезиста с коррекцией режимов по спутникам с целью исключения бокового подтравла. Канавки также способствовали снижению напряжений в структурах кристаллов, уменьшая площадь контакта плёнки с сапфиром.

На рис. 2 представлена в разрезе структура элементарного фотодиода. Показаны активная область p - n перехода, сформированная слоем p^+ -анода в плёнке кремния, металлизированные контакты к p^+ -аноду и n^+ -катоду, межслойный диэлектрик из слоёв нитрида и двуокиси кремния, а также пассивирующая плёнка фосфоросиликатного стекла (ФСС).

Рис. 2

Структура элементарного фотодиода

Данная структура была реализована по технологическому маршруту с использованием операций фотолитографии, осаждения диэлектрических и проводящих слоёв, операций ионного легирования, термических обработок и плазмохимического травления.

Маршрут изготовления диодов можно описать несколькими основными блоками технологических операций:

1. «Межслойный диэлектрик».

Формирование рельефа по светоотражающему покрытию плёнок нитрида и двуокиси кремния. Формирование знаков совмещения для последующих фотолитографий.

2. «Анод» и «Катод».

Формирование светочувствительных областей анода и катода.

3. «Металлизация».

Формирование металлической разводки.

4. «Канавки».

Травление канавок, ограничивающих фоточувствительные области диодов.

5. «Пассивация».

Формирование защитного слоя ФСС.

6. «ЭФП».

Измерение электрофизических параметров.

Режимы проведения технологических операций и маршрут изготовления в целом моделировались с использованием технологической САПР TCAD. Для получения низкой величины темнового тока фотодиодов (~ 1 мкА) и достаточно высоких значений токовой чувствительности (не менее 0,3 А/Вт) по результатам моделирования выбиралось оптимальное соотношение параметров ионной имплантации и высокотемпературного отжига. В области p^+ -анода имплантировался бор через буферный окисел по маске фоторезиста. Для снижения контактного сопротивления в области n^+ -катода имплантировали фосфор. Дозы легирования составляли

$3..5 \cdot 10^{15}$ ион·см⁻². Попытка подлегирования малыми дозами поверхности структур не привела к снижению величины тока утечки по латеральным областям p - n перехода. Определялись температура и время обработки пластин, достаточные для полной активации имплантированной примеси и отжига радиационных дефектов. Величина температуры не превышала 950 °С для исключения диффузии алюминия из подложки. Использовался режим плавного нагрева пластин для снижения нарушений структуры границы раздела. Разводка по металлу формировалась с использованием плазмохимического травления алюминия и жидкостного травления поликремниевой крошки. Структуры пассивировались фосфоросиликатным стеклом с содержанием фосфора не более 5 %. Фотодиоды отбраковывались по основным параметрам: темновому току и токовой чувствительности. Для повышения выхода годных фотодиодов по параметру радиационная стойкость была разработана методика радиационной отбраковки кристаллов на пластине на рентгеновском имитационном комплексе. В ходе экспериментов по внедрению методики обнаружено, что 100 % радиационная отбраковка ФД не требуется ввиду близости их параметров на пластинах.

Результаты измерения параметров и их обсуждение

Параметры ФД измеряли с использованием устройства проверки, обеспечивающего проведение измерений таких характеристик, как темновой ток, токовая чувствительность, пороговая мощность, собственная постоянная времени, фото-

электрическая связь между фоточувствительными элементами в составе фотодиодов. В составе устройства проверки имелись устройство засветки с лазерным модулем и измерительный стенд с пультом контроля параметров, мультиметром, осциллографом и источниками питания. Измерения темнового тока и токовой чувствительности выполняли по разработанным методикам на пластинах с использованием зондовых устройств и в корпусах на измерительных стендах. Источник лазерного излучения имел длину волны 0.635 мкм, диаметр выходного пучка 6 мм и расходимость 0.5 мрад. Измерения проводились при мощности лазерного излучения на выходе из устройства засветки 2.3 мВт. Критичным являлся вывод оси пучка относительно кристалла, что трудно было сделать при измерениях в особенности ФД, содержащих в своём составе два фоточувствительных элемента. Параметры фотодиодов измерялись при двух режимах работы – фотогальваническом и фотодиодном при непрерывном и импульсно-периодическом режимах работы источника оптического излучения. Темновой ток контролировали при различных значениях обратного напряжения 1..5 В. В фотодиодном режиме токовую чувствительность рассчитывали из фототока с поправкой на темновой ток. При расчёте токовой чувствительности учитывались диаметр и расходимость пучка, мощность лазерного излучения на выходе из устройства засветки, площади фоточувствительных элементов.

В таблице приведены средние значения темнового тока и токовой чувствительности одноэлементных и двухэлементных

фотодиодов на КНС структурах и для сравнения на объёмном кремнии, изготовленных по аналогичной технологии.

Таблица

Средние значения темнового тока и токовой чувствительности фотодиодов

Тип фотодиода	Темновой ток при смещении 5 В, мкА	Токовая чувствительность, А/Вт
На структурах КНС с одним ФЧЭ	0.81	0.408
На кремнии с одним ФЧЭ	0.02	0.622
На структурах КНС с двумя ФЧЭ	0.36	0.48
На кремнии с двумя ФЧЭ	0.02	0.78

Как видно из таблицы, параметры КНС фотодиодов уступают параметрам фотодиодов на кремнии, что обусловлено дефектностью структур КНС. Вместе с тем их величина соответствует требованиям к обеспечению работоспособности аппаратуры.

При измерении пороговой мощности ФД измеряли фототок при воздействии на образцы светового облучения калиброванной мощности. В оптический тракт вводились фильтры с различной кратностью

ослабления мощности. Измерения пороговой мощности в соответствии с методикой [7] по уровню фототока, соответствующему удвоенному значению темнового тока, составляли 2.0 мкВт для ФД с одним ФЧЭ и 1.0 мкВт для двухэлементных фотодиодов. По методике 30 % превышения темнового тока пороговая мощность составляла 0.7 мкВт и 0.3 мкВт соответственно.

Измерения значений параметров ФД в диапазоне температур $-50...+85$ °С выполняли с использованием специализированной оснастки. Величина темнового тока с ростом температуры возрастала, при этом росла токовая чувствительность за счёт увеличения фототока. При снижении температуры величина токовой чувствительности уменьшалась на 15-30 %, сохраняя значение выше 0.3 А/Вт.

Импульсно-периодические параметры фотодиодов исследовались в фотогальваническом и фотодиодных режимах при воздействии модулированного излучения от лазерного модуля. Собственная постоянная времени ФД определялась как разность по времени поданного на светоизлучающий элемент и принятого фотодиодом сигнала. Величина собственной постоянной времени по результатам измерений не превышала 100 нс для всех типов ФД.

Стойкость фотодиодов к воздействию ионизирующего излучения исследовалась с использованием моделирующих установок и имитационного оборудования. Исследовалось воздействие статического и импульсного γ и γ -нейтронного излучений. Экспериментальные данные свидетельствуют, что максимальные уровни воздействия статического γ излучения не

приводят к значительным изменениям характеристик как КНС, так и кремниевых фотодиодов. Измерения фотоЭДС диодов до и после облучения показали, что деградация фотосигнала ФД на кремнии после воздействия составляла 10...20 %. Деградация фотодиодов на КНС структурах не превышала 7 %, при этом у некоторых образцов уровень фотосигнала увеличивался по сравнению с исходным уровнем до воздействия на 25 %. Аналогичные результаты были получены при облучении на рентгеновском имитационном комплексе с эквивалентными уровнями воздействий. При статическом радиационном воздействии на всех типах фотодиодов наблюдался рост темнового тока, однако его уровень не выходил за пределы 1.5 мкА.

Значительные отличия в характере поведения КНС и кремниевых фотодиодов наблюдались при импульсных γ и γ -нейтронных воздействиях. В момент импульсного воздействия проводилось измерение наведённого радиацией тока и контролировалось время потери работоспособности диодов. Длительность импульса γ -излучения составляла ~ 30 нс. Совпадал характер осциллограмм сигналов с выхода фотодиодов при воздействии импульсного γ -излучения и лазерного излучения на лазерном имитационном комплексе. На рис. 3 показана типичная осциллограмма сигнала кремниевого фотодиода при импульсном воздействии. Время потери работоспособности образцов, изготовленных на кремнии, при импульсных воздействиях доходило до 150 мкс, а для образцов КНС фотодиодов составляло единицы микросекунд. После

импульсных воздействий остаточных эффектов в образцах КНС фотодиодов обнаружено не было. Деграация параметров образцов на кремнии не превышала 5 %.

Рис. 3

Осциллограмма сигнала кремниевого фотодиода при импульсном воздействии: a — импульс излучения, b — отклик тока с фотодиода

Значительное влияние на параметры, особенно кремниевых фотодиодов, оказывало нейтронное облучение. Деграация параметров фотодиодов на структурах КНС после импульсного нейтронного облучения составляла единицы процентов, при этом деграация параметров фотодиодов на кремнии была более 80 %. Таким образом, КНС фотодиоды в результате воздействия ионизирующего излучения сохраняли работоспособность, а кремниевые фотодиоды практически полностью её теряли.

Учитывая идентичность конструкции и технологии изготовления фотодиодов, можно заключить, что их радиационная стойкость обусловлена использованием

КНС структур. Наличие у КНС фотодиодов сапфировой подложки ограничивает потоки носителей в глубину структуры, что качественно отличает их от ФД на объёмном кремнии. Гамма-нейтронное облучение разупорядочивает структуру кремния, а так как траектория движения электронов и дырок в объёмном кремнии значительно больше, следовательно, возрастает и вероятность захвата их на радиационные дефекты. Поэтому ФД на КНС структурах сохраняют свои параметры при ионизирующем излучении, а ФД на кремнии теряют фоточувствительность.

Заключение

В работе представлены конструкция и технология изготовления стойких к ионизирующему излучению спектра деления фотодиодов на структурах «кремний на сапфире». Кристаллы фотодиодов изготавливались по планарной технологии с использованием групповой обработки пластин. Режимы проведения технологических операций и маршрут изготовления оптимизированы для получения фотодиодов с минимальными значениями темнового тока и величиной токовой чувствительности более 0.3 А/Вт. Разработанная технология позволила сохранить в процессе изготовления фотодиодов совершенную структуру границы раздела кремний-сапфир с высокой отражающей способностью для носителей заряда.

Для различных применений в системах управления разработаны два конструктивных варианта фотодиодов с одним фоточувствительным элементом и двумя фоточувствительными элементами на одном

кристалле с низким коэффициентом фотоэлектрической связи. Проведено сравнение параметров фотодиодов, изготовленных по технологии КНС и на объёмном кремнии. Показано, что ФД на структурах КНС сохраняют свои характеристики при воздействии ионизирующего излучения в отличие от ФД на объёмном кремнии, что обусловлено ограниченным объёмом области сбора и рекомбинации носителей заряда в структурах КНС.

На основе разработанной конструкции и технологии изготовления освоено мелкосерийное производство одно- и двухэлементных фотодиодов 2ОФ142А и 2ОФ143А, предназначенных для использования в устройствах систем управления бортовой аппаратуры специального назначения.

Литература

1. Филачев, А.М. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды / А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Тришенков. – М.: Физматкнига, 2011. – 215 с.
2. Бутин, В.П. Система радиационных испытаний изделий электронной техники / В.П. Бутин, В.Ф. Зинченко, А.А. Романенко. – М.: Радио и связь, 2004. – 156 с.
3. Першенков, В.С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
4. Патент № 2611552 Российская Федерация, МПК H01L 31/18 (2006.01), H01L 31/04 (2014/01). Фотоприёмное устройство (варианты) и способ его изготовления: № 205129631: заявл. 17.07.2015; опубл. 28.02.2017 / Ю.А. Кабальнов, В.К. Киселев, А.Н. Труфанов;

заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова». – 4 с. – Текст: непосредственный.

5. A. Fernando Imaging of the silicon on sapphire interface by high-resolution electron microscopy. Applied Physics Letters, 1981, vol. 38, pp.439-441.
6. E. Gartstein Structural aspects of the interface in silicon-on-sapphire system. – Thin Solid Films, 1998, vol. 319, pp.182-186.
7. Геда, Н.Ф. Измерение параметров приборов оптоэлектроники / Н.Ф. Геда. – М.: Радио и связь, 1981. – 375 с.

References

1. A.M. Filachev, I.I. Taubkin, M.A. Trishenkov. Solid-state Photo-electronica. Photodiodes / M.: Physmatkniga, 2011, p. 215.
2. V.P. Butin, V.F. Zinchenko, A.A. Romanenko. Syastem of radiation tests for electronic engineering products / M.: Radio and communication, 2004, p.156.
3. V.S. Pershenkov, V.D. Popov, A.V. Shal'nov. Surface radiation effects in integrated-circuit elements / M.: Energoatomizdat, 1988, p. 256.
4. Yu. A. Kabal'nov, V.K. Kiselev, A.N. Trufanov. Photodetector and method of its manufacturing // Invention certificate # 2611552 dated July 17, 2015.
5. A. Fernando, Imaging of the silicon on sapphire interface by high-resolution electron microscopy, Appl. Phys. Lett., vol.38, 1981, pp 439-441.
6. E. Gartstein, Structural aspects of the interface in Silicon-on-sapphire system, Thin Solid Films, vol. 319, 1998, pp 182-186.
7. N.F. Geda. Optoelectronics devices parameters measurement. / M.: Radio and communication, 1981, p. 375.