

07

О связи радиационно-стимулированной фотолюминесценции с атомами азота в p -4H-SiC

© А.А. Лебедев¹, Б.Я. Бер¹, Е.В. Богданова¹, Н.В. Середова¹,
Д.Ю. Казанцев¹, В.В. Козловский²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

E-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2015 г.

Исследована фотолюминесценция, возникающая в p -4H-SiC после облучения электронами. Предложена модель, объясняющая зависимость интенсивности фотолюминесценции от дозы облучения. Сделан вывод, что активатором фотолюминесценции являются донорно-акцепторные пары азот–радиационный дефект.

Коротковолновая фотолюминесценция (ФЛ) в диапазоне энергий 2.6–2.3 eV была обнаружена В.В. Макаровым в 1966 г. [1] в кристаллах n -SiC (6H) после их облучения ионами К и Li с последующим отжигом. Спектр люминесценции состоял из двух триплетов узких линий (H - и L -линий), расположенных вблизи энергий 2.6 eV, и широкой бесструктурной полосы с максимумом излучения при 2.35 eV. Позже было установлено, что данная ФЛ возникает после облучения SiC электронами, нейтронами, а также может присутствовать в спектре исходных образцов (см. обзор [2] и имеющиеся там ссылки). В [3] было предложено оставить название „спектр D1“ за коротковолновой частью обнаруженного В.В. Макаровым спектра (H - и L -линии), а длинноволновую часть данного спектра (широкую бесструктурную полосу) называть „дефектная“ фотолюминесценция (ДФЛ).

Анализ характеристик ДФЛ с позиций различных рекомбинационных механизмов привел авторов [3] к выводу, что основная рекомбинация идет через донорно-акцепторные пары (ДАП) типа азот–структурный дефект, в том числе возникающий и после облучения SiC. Однако исследование влияния концентрации атомов азота на интенсивность ДФЛ в известной нам литературе представлено не было. Целью

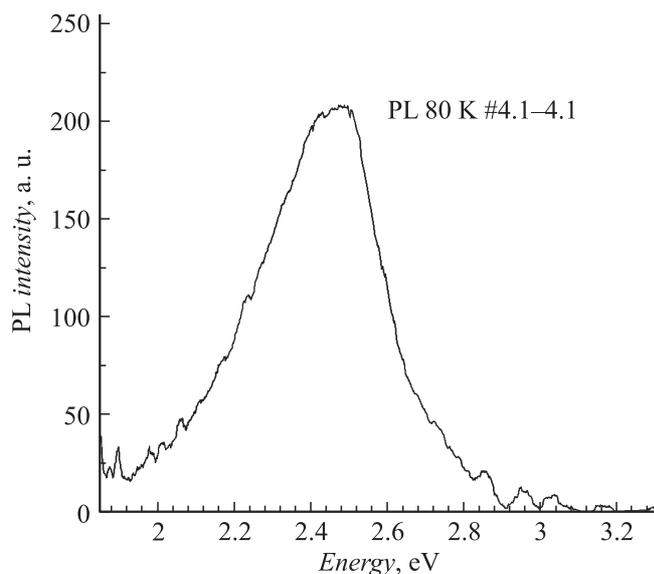


Рис. 1. Типичный спектр ДФЛ в 4H-SiC после облучения.

данной работы было экспериментальное и теоретическое исследование зависимости интенсивности ДФЛ от дозы облучения электронами в образцах с различной концентрацией азота.

Образцы карбида кремния 4H-SiC представляли собой эпитаксиальные пленки толщиной $50 \mu\text{m}$, выращенные методом CVD в Германии (Leibniz-Institute for Crystal Growth, Berlin). Облучение электронами с энергией 0.9 MeV проводилось на импульсном ускорителе resonant transformer accelerator (частота импульсов 490 Hz, длительность импульса $330 \mu\text{s}$) на охлаждаемой проточной водой мишени. Пробег электронов с энергией 0.9 MeV составляет $\sim 1.0 \text{ mm}$ в SiC. Средняя плотность тока пучка электронов составляла $12.5 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Можно считать, что при облучении дефекты вводились равномерно по объему образцов, поскольку толщина облучаемых образцов SiC была значительно меньше длины пробега заряженных частиц.

Для возбуждения ФЛ использовался азотный лазер, работающий на длине волны 337.1 nm и имеющий следующие параметры: импульсная

Используемые при расчете параметры

Параметры	Значения	
	Образец № 1	Образец № 2
N_{\max}, cm^{-3}	$1.5 \cdot 10^{16}$	$0.5 \cdot 10^{16}$
$I_0, \text{rel. units}$	8	30
$I_{\max}, \text{rel. units}$	100	60
γ, cm^2	$2.35 \cdot 10^{-15}$	$2.35 \cdot 10^{-15}$
α, cm^3	$6.7 \cdot 10^{-15}$	$12 \cdot 10^{-15}$
$N_{\text{DAP}}^0, \text{cm}^{-3}$	$0.18 \cdot 10^{16}$	$0.25 \cdot 10^{16}$
N_0, cm^{-3}	$1.32 \cdot 10^{16}$	$0.25 \cdot 10^{16}$

мощность — 2 kW, длительность импульса — 10 ns, частота повторения импульсов — 100 Hz. Плотность мощности накачки составляла $\sim 50 \text{ kW/cm}^2$. Исследования спектров ФЛ проводились при температуре жидкого азота (77 K). Были проведены исследования спектров ФЛ как исходных образцов, так и после каждой дозы облучения. Типичный спектр ДФЛ представлен на рис. 1.

После завершения измерения зависимости интенсивности ДФЛ от дозы облучения в образцах проводилось измерение концентрации атомов азота. Эта величина определялась методом динамической вторично-ионной масс-спектрометрии с использованием ионного микрозонда SAMECA IMS 7f. В качестве первичного пучка использовались ионы $^{133}\text{Cs}^+$ с энергией удара по мишени 15 keV, пучок которых развертывался на мишени в растр $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. Детектировались вторичные отрицательные молекулярные ионы $^{12}\text{C}^{14}\text{N}^-$. Для исключения масс-интерференции с вторичными ионами $^{13}\text{C}_2^-$ массовое разрешение прибора устанавливалось $M/\Delta M = 7500$. Зарядка мишени подавлялась с помощью облучения ее в процессе измерений пучком электронов низких энергий. Глубина кратера ионного травления определялась с помощью механического стилусного профилометра AMBIOS XP-1. Количественный анализ содержания азота проводился с использованием образца сравнения — подложки карбида кремния, в которую методом ионной имплантации было введено известное содержание атомов азота [4]. Результаты измерений содержания азота приведены в таблице.

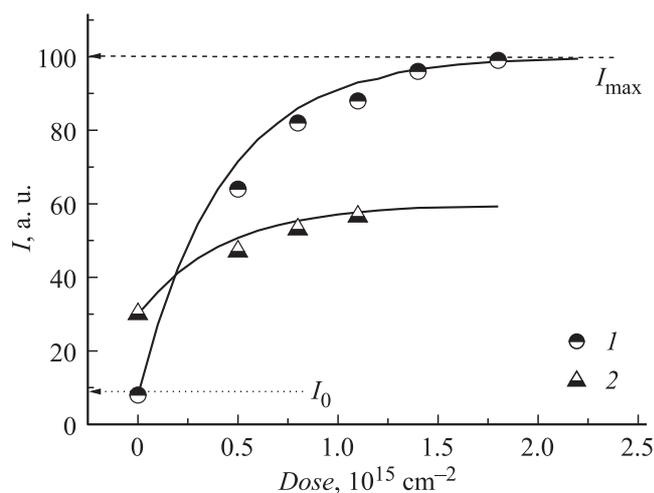


Рис. 2. Зависимость интенсивности ДФЛ (I) p - $4H$ -SiC от дозы облучения электронами: 1 — данные для образца № 1; 2 — данные для образца № 2. Линии — расчет по формуле (4) с использованием параметров таблицы.

Ранее было показано, что при облучении образцов n - $4H$ -SiC наблюдалось появление ДФЛ, причем ее интенсивность росла линейно до максимальных доз облучения [5]. Характер изменения интенсивности ФЛ не зависел от типа облучающих частиц (протоны или электроны). Это говорит о том, что зависимость $I = F(D)$ определяется свойствами образца, а не типом облучающих частиц.

В образцах p - $4H$ -SiC также наблюдалось появление ДФЛ, однако в отличие от n - $4H$ -SiC интенсивность ДФЛ выходила на насыщение (рис. 2). Очевидно, что рост интенсивности ДФЛ связан с ростом концентрации ДАП, через которые происходит излучательная рекомбинация. Рост концентрации ДАП будет происходить за счет соединения атомов азота с образующимися при облучении структурными дефектами. Зависимость $I = F(D)$ выйдет на насыщение, когда концентрация свободного азота станет мала. Вероятно, что в карбиде кремния n -типа проводимости концентрация атомов азота (основной донорной примеси) будет больше, чем в образцах p -типа проводимости. Таким образом, для выхода зависимости $I = F(D)$ на насыщение в n -SiC потребуется существенно бóльшая доза облучения, чем в p -SiC.

Выражение для интенсивности ДФЛ (I) можно записать как

$$I = \alpha(N_{\text{DAP}}^0 + N_{\text{DAP}}), \quad (1)$$

где α — коэффициент, связывающий интенсивность внешнего возбуждения с интенсивностью ДФЛ; N_{DAP}^0 — исходная концентрация донорно-акцепторных пар, активаторов ДФЛ; N_{DAP} — концентрация донорно-акцепторных пар, образующихся после облучения.

В работах [6,7] были проанализированы различные механизмы радиационной компенсации полупроводников. По аналогии с [6,7] можно записать изменение концентрации ДАП в процессе облучения

$$dN_{\text{DAP}}/dt = n_{\text{FF}}\beta G\tau N, \quad (2)$$

где $N = N_0 - N_{\text{DAP}}$, N_0 — концентрация атомов азота к началу облучения, не входящая в состав ДАП; N_{max} — общая концентрация атомов азота в образце; n_{FF} — скорость генерации пар Френкеля при облучении; β — константа взаимодействия атома азота и радиационного дефекта (зависящая от скорости движения дефекта по кристаллу и вероятности процесса взаимодействия при встрече); G — поток электронов в единицу времени; τ — время жизни радиационного дефекта.

Решением уравнения (2) при граничных условиях $t = 0 \Rightarrow N_{\text{DAP}} = 0$, $t = \infty \Rightarrow N_{\text{DAP}} = N_0$ будет

$$N_{\text{DAP}} = N_0[1 - \exp(-n_{\text{FF}}\beta G\tau t)]. \quad (3)$$

С учетом того, что $Gt = D$, где D — доза облучения, и заменив $n_{\text{FF}}\beta\tau = \gamma$, подставим (3) в (1)

$$I = \alpha N_{\text{DAP}}^0 + \alpha N_0[1 - \exp(-\gamma D)]. \quad (4)$$

Из экспериментальной зависимости интенсивности ФЛ от дозы облучения (рис. 2) легко выделить $I_0 = \alpha N_{\text{DAP}}^0$, интенсивность ФЛ до начала облучения и $I_{\text{max}} = \alpha N_{\text{DAP}}^0 + \alpha N_0$, т.е. значение, при котором интенсивность насыщается. Физически это означает, что практически все атомы азота вошли в состав ДАП.

Тогда уравнение (4) нетрудно преобразовать к виду

$$\ln [(I_{\text{max}} - I)/(I_{\text{max}} - I_0)] = -\gamma D. \quad (5)$$

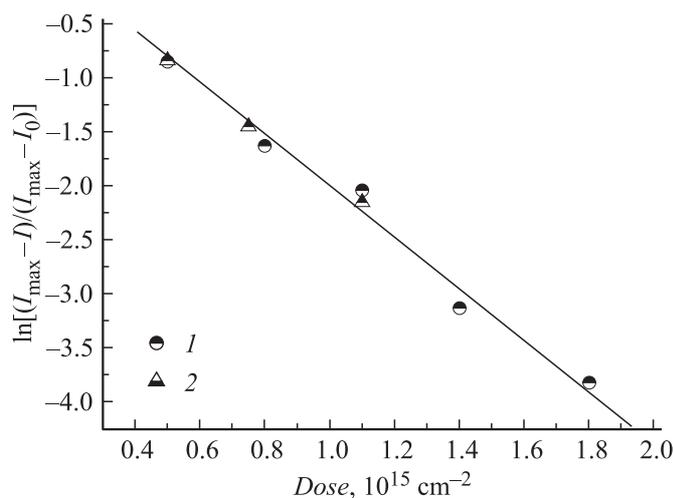


Рис. 3. Зависимость величины $\ln[(I_{\max} - I)/(I_{\max} - I_0)]$ от дозы облучения электронами: 1 — данные для образца № 1; 2 — данные для образца № 2.

Из тангенса угла наклона описываемой выражением (5) зависимости можно найти значение γ (см. таблицу). Графическое изображение экспериментальной зависимости (5) представлено на рис. 3.

Остальные, необходимые для расчета зависимости $I = F(D)$ можно найти с использованием известной нам общей концентрации атомов азота в образце (N_{\max})

$$\alpha = I_{\max}/(N_{\text{DAP}}^0 + N_0) = I_{\max}/(N),$$

$$N_{\text{DAP}}^0 = (I_0/I_{\max})N_{\max},$$

$$N_0 = N_{\max}(1 - I_0/I_{\max}).$$

На рис. 2 представлена расчетная зависимость функции $I = F(D)$ и экспериментально полученные точки. Как видно из рисунка, наблюдается хорошее соответствие эксперимента и расчета.

Таким образом, как показал анализ полученных экспериментальных результатов, зависимость интенсивности „дефектной ФЛ“ от дозы облучения хорошо объясняется на основе предположения, что данная ФЛ обусловлена ДАП-рекомбинацией на паре азот-радиационный дефект.

Измерения методом ВИМС выполнены в ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.621.21.0007, id RFMEFI62114X0007).

Список литературы

- [1] Макаров В.В., Петров Н.Н. // ФТТ. 1966. Т. 8. С. 1602.
- [2] Лебедев А.А. // ФТП. 1999. Т. 32. № 2. С. 129–155.
- [3] Андреев А.Н., Аникин М.М., Лебедев А.А., Полетаев Н.К., Стрельчук А.М., Сыркин А.Л., Челноков В.Е. // ФТП. 1994. Т. 28. В. 5. С. 729–738.
- [4] Wilson R.G., Stevie F.A., Magee C.W. Secondary Ion Mass Spectrometry. A Practical Handbook for Depth Profiling and Bulk Impurity Analysis. Wiley, 1989.
- [5] Козловский В.В., Лебедев А.А., Ломасов В.Н., Богданова Е.В., Середова Н.В. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 8. С. 1033–1036.
- [6] Козловский В.В., Васильев А.Е., Емцев В.В., Лебедев А.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 9. С. 101–104.
- [7] Kozlovski V.V., Lebedev A.A., Bogdanova E.V. // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. P. 155 702.