

Исследование экситонной электролюминесценции $p-n$ -структур на основе $6H$ -SiC, полученных сублимационной эпитаксией

© А.А. Лебедев, Н.К. Полетаев, М.Ц. до Кармо*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

*Университет Авейро, Авейро, Португалия

(Получена 30 января 1997 г. Принята к печати 22 апреля 1997 г.)

Проведено исследование спектров электролюминесценции $p-n$ -структур на основе $6H$ -SiC, полученных сублимационной эпитаксией. Обнаружено, что интенсивность экситонной полосы быстро увеличивается с ростом плотности прямого тока и что данная полоса становится преобладающей в спектре излучения диода при больших плотностях прямого тока и повышенных температурах. Исследование сдвига положения максимума излучения данной полосы с ростом температуры показывает, что она скорее всего обусловлена рекомбинацией свободного экситона.

Введение

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию краевой фотолуминесценции и электролюминесценции (т.е. излучения с энергией кванта, близкой к ширине запрещенной зоны) в $6H$ -SiC [1–6], многие вопросы, связанные с природой наблюдаемого излучения, еще не имеют окончательного решения. Так, остается не выясненным, обусловлено краевое излучение аннигиляцией свободного или связанного экситона [5]. Кроме того исследования коротковолновой части спектра излучения $p-n$ -структур на основе $6H$ -SiC позволяют получить важную информацию о зонной структуре карбида кремния.

В настоящей работе были исследованы $p-n$ -структуры на основе $6H$ -SiC, полученные методом сублимационной эпитаксии (СЭ) в открытой системе [7], которые, с одной стороны, широко используются для изготовления различных полупроводниковых приборов на основе SiC [8], и в которых, с другой стороны, подробное изучение экситонной электролюминесценции (ЭЛ) ранее не проводилось.

Предварительные замечания

Ранее исследование экситонной полосы в $6H$ -SiC проводилось главным образом методом фотолуминесценции и в области низких температур, $T \leq 300$ К [2,6]. Это было обусловлено тем, что в спектре ЭЛ на основе $p-n$ -структур $6H$ -SiC преобладали широкие полосы, связанные с рекомбинацией носителей на фоновых глубоких акцепторных уровнях, которые накладывались на экситонное излучение. В $p-n$ -структурах, полученных методом СЭ, при комнатной температуре максимум излучения находится в желто-зеленой области спектра. Это излучение обусловлено главным образом рекомбинацией носителей на D -центрах ($E_v + 0.58$ эВ), наличие которых связано с неконтролируемым легированием бором выращенных данным методом эпитаксиальных слоев [9]. (Примесь бора содержится в использующейся для роста графитовой арматуре.)

В $p-n$ -структурах, полученных жидкостной и бесконтейнерной жидкостной эпитаксией, [4,5] концентрации D -центров на несколько порядков меньше, однако при этом в n -базе, как правило, имеется фоновая концентрация алюминия, дающего излучение в синей области спектра. Энергия ионизации центра — активатора ЭЛ (~ 0.27 эВ) в данном случае существенно меньше, что приводит к значительному температурному гашению ЭЛ уже при $T \simeq 300$ К. Однако ЭЛ, связанная с примесью алюминия, по своему спектральному положению находится гораздо ближе к экситонному пику и может мешать его наблюдению даже при небольшой интенсивности. Поэтому с нашей точки зрения было актуальным исследование экситонной ЭЛ в $p-n$ -структурах, полученных методом СЭ и имеющих малую концентрацию фоновых акцепторных уровней.

Образцы

Исследовавшиеся в настоящей работе $p-n$ -переходы были сформированы на грани (0001) Si монокристаллических n^+ -подложек карбида кремния политипа $6H$. Легирующий примесью служили Al (p -тип) и N (n -тип проводимости). Толщина эпитаксиальных слоев p -типа составляла $1 \div 2$ мкм, а толщина слоев n -типа — $5 \div 10$ мкм. Площадь $p-n$ -структур составляла $\sim 2.5 \cdot 10^{-3}$ см². Для снижения фоновой концентрации глубоких акцепторных уровней в слое n -типа проводимости до эпитаксии проводился длительный отжиг ростовой ячейки в вакууме при температурах $> 2000^\circ$ С.

Эксперимент

Как показали DLTS-измерения, концентрация i - и D -центров в исследовавшихся $p-n$ -структурах была в $2 \div 3$ раза меньше, чем в образцах, исследовавшихся в [7,8]. В соответствии с этим интенсивность желто-зеленой полосы была слабой и экситонную электролюминесценцию можно было наблюдать при токах $> 10^{-3}$ А (рис. 1). Спектральное положение экситонной полосы

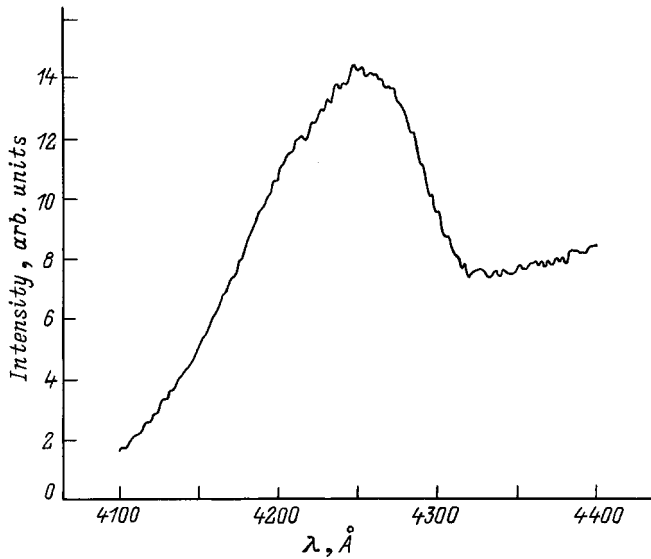


Рис. 1. Спектр краевой электролюминесценции $p-n$ -структур при комнатной температуре. $J = 30$ мА.

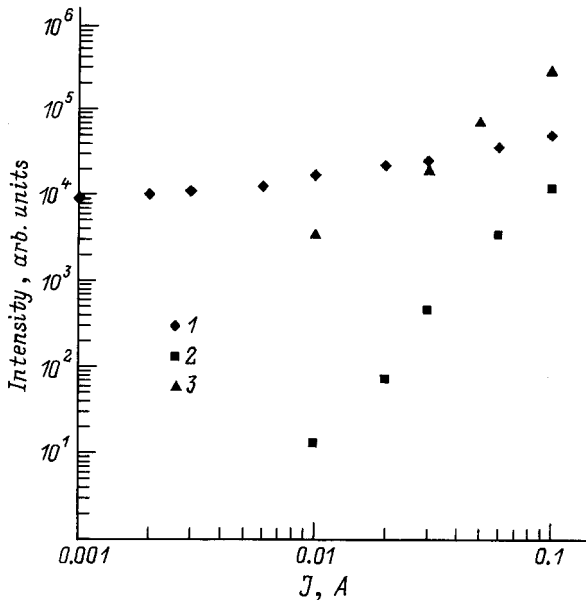


Рис. 2. Зависимости интенсивностей полос электролюминесценции от прямого тока: желто-зеленая полоса при 300 К (1); экситонная полоса при 300 (2) и 650 К (3).

($\lambda_{\max} \approx 425 \pm 1$ нм) хорошо совпадало с данными других авторов для спектров как фотолюминесценции, так и электролюминесценции. Интенсивность экситонного пика увеличивалась с ростом тока быстрее, чем интенсивность излучения в какой-либо другой части спектра ЭЛ (рис. 2). Более детальное рассмотрение показало, что интенсивность экситонной линии (I_{ex}) увеличивалась с ростом тока (J) как $I_{\text{ex}} = (J)^n$, где $n = 2 \pm 0.2$. При этом особенно быстрый рост интенсивности экситонной полосы наблюдался в области малых токов $J = (1 \div 6) \cdot 10^{-2}$ А. Возможно, это было

связано с увеличением диффузионной длины дырок при увеличении уровня инжекции [10].

С увеличением температуры образца и величины прямого тока экситонный пик становился доминирующим в спектре излучения диода (рис. 3). Это происходило по следующим причинам: 1) более быстрый рост пика I_{ex} с ростом J , чем каких-либо других полос электролюминесценции; 2) рост величины диффузионной длины дырок с ростом температуры [11]; 3) температурное гашение всех полос ЭЛ, кроме экситонной. При температуре 650 К сохранялась прежняя зависимость интенсивности

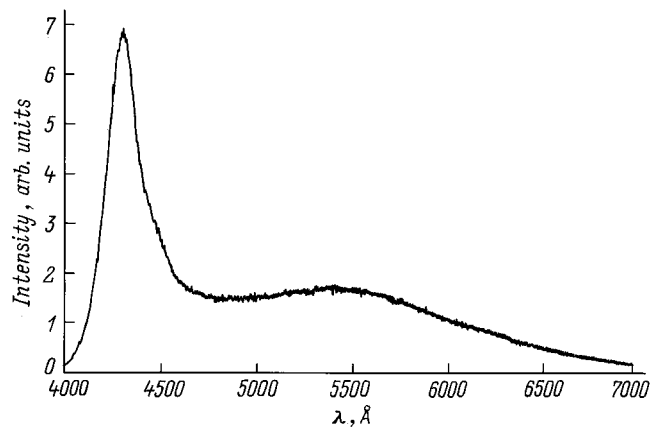


Рис. 3. Спектр электролюминесценции $p-n$ -структур при $T = 450$ К. $J = 500$ мА.

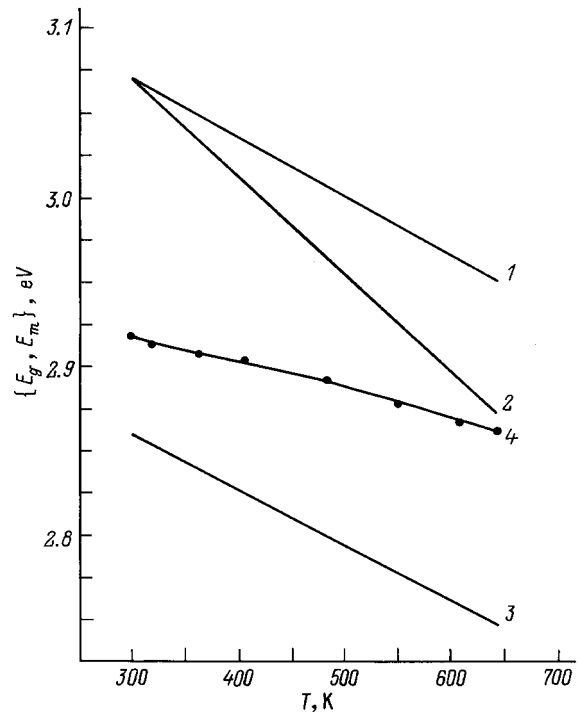


Рис. 4. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны (E_g) $6H$ -SiC по данным работ: 1 — [13], 2 — [14], 3 — [12]. 4 — экспериментальная температурная зависимость положения максимума (E_m) экситонной электролюминесценции.

экситонной полосы от плотности прямого тока с $n = 2$. С ростом температуры наблюдалось смещение положения максимума экситонной ЭЛ в длинноволновую область (рис. 4).

Обсуждение результатов

Существует несколько статей, посвященных определению величины запрещенной зоны $6H$ -SiC и ее температурной зависимости. На рис. 4 представлены результаты трех наиболее известных работ [12–14]. На этом же рисунке приведены экспериментальные данные по температурной зависимости максимума экситонной ЭЛ, полученные в настоящем исследовании. Как видно из рисунка, наши экспериментальные данные располагаются выше зависимости, полученной в работе [12], уже при комнатной температуре, а при 650 К совпадают с шириной запрещенной зоны, полученной в работе [14]. Таким образом, по нашему мнению, экспериментальные данные, полученные в данной работе, согласуются только с результатами работы [13], так как энергия экситонного излучения не может превышать ширину запрещенной зоны ни при какой температуре. Как видно из рис. 4, энергия максимума экситонной ЭЛ с увеличением температуры уменьшается слабее, чем величина запрещенной зоны (E_g), т.е. существует температурная зависимость величины $E_g - h\nu_{\max} \simeq -kT$, которая характерна для излучения, обусловленного аннигиляцией свободного экситона [2].

Заключение

Проделанная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Положение максимума краевой электролюминесценции $6H$ -SiC $p-n$ -структур и его температурная зависимость, полученные в данной работе, согласуются только с результатами измерения температурной зависимости E_g $6H$ -SiC, приведенной в работе [13].

2. Квадратичная зависимость интенсивности краевой ЭЛ $p-n$ -структур от тока, так же как температурная зависимость $E_g - h\nu_{\max} \simeq -kT$ указывают на то, что ЭЛ скорее всего обусловлена рекомбинацией свободного экситона в $6H$ -SiC.

Часть работы выполнена при поддержке Университета Аризоны (США).

Список литературы

- [1] Э.Е. Виолин, Г.Ф. Холуянов. ФТТ, **6**, 593 (1964).
- [2] M. Ikeda, T. Haykava, H. Matsunami, T. Tanaka. J. Appl. Phys., **50**, 8215 (1979).
- [3] W. v. Münch, W. Kürzinger. Sol. St. Electron., **21**, 1129 (1978).
- [4] В.А. Дмитриев, П.А. Иванов, Я.В. Морозенко, И.В. Попов, В.Е. Челноков. Письма ЖТФ, **11**, 246 (1985).

- [5] М.М. Аникин, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков, А.Е. Черенков. ФТП, **28**, 284 (1994).
- [6] А.М. Данишевский, А.Ю. Рогачев. ФТП, **30**, 17 (1996).
- [7] М.М. Anikin, A.A. Lebedev, S.N. Pyatko, A.M. Strel'chuk, A.L. Syrkin. Mater. Sci. Eng., **B11**, 113 (1992).
- [8] М.М. Anikin, P.A. Ivanov, A.A. Lebedev, S.N. Pyatko, A.M. Strel'chuk. In: *Semiconductor Interfaces and Microstructures*, ed by Z.C. Feng (World Scientific, Singapore) p. 280.
- [9] A.A. Lebedev, V.E. Chelnokov. Diamond and Related Mater., **3**, 1393 (1994).
- [10] А.А. Лебедев. ФТП, **30**, 999 (1996).
- [11] А.М. Стрельчук. ФТП, **29**, 1190 (1995).
- [12] H.R. Philipp, E.A. Taft. *Silicon Carbide—a High Temperature Semiconductor*, ed by J.R. O'Connor and J. Smiltens (Oxford—London—New York—Paris, Pergamon Press, 1960) p. 306.
- [13] W.J. Choyke. Mater. Res. Bull., **4**, S141 (1968).
- [14] А.Н. Пихтин, Д.А. Яськов. ФТТ, **12**, 1597 (1970).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of the exciton electroluminescence of $6H$ -SiC $p-n$ structures grown by sublimation epitaxy

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
*Aveiro University, 3800 Aveiro, Portugal

Abstract Electroluminescence spectra of $6H$ -SiC obtained by sublimation epitaxy were investigated. It is shown that exciton band intensity increased very quickly with increasing forward current (J) and became to predominate in the diode radiation spectrum at high values of J and elevated temperatures. Investigation of the temperature bias of the band maximum position shows that this radiation is connected with recombination of a free exciton.