

06.2; 06.3; 12

© 1993

ИНЖЕКЦИОННЫЕ $p-i-n$ СВЕТОДИОДЫ
НА ШИРОКОЗОННЫХ АМОРФНЫХ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННЫХ
СПЛАВАХ КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДД. Х а н о в, А.А. А н д р е е в,
Р.К. М а в л я н о в, Т. Т у р г у н о в,
А. Ч а р ы к у л и е в

Метод плазменного разложения силанов на частотах УВЧ диапазона (75–250 МГц), предложенный в [1], был использован для получения аморфных гидрогенизированных сплавов системы кремний–углерод. Метод оказался эффективным при работе с газовой смесью силан–метан. Именно благодаря повышенной концентрации высокоэнергетичных электронов в УВЧ разряде удалось сбалансировать парциальные скорости диссоциации силана и метана и получить обогащенные углеродом широкозонные сплавы $a-Si_{1-x}C_x:H$ со значением X до 0.8. На рис. 1 приведен ход оптической ширины запрещенной зоны полученных материалов в зависимости от состава. Ширина зон оценивалась двумя методами: первый – по уровню поглощения $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$; второй – путем экстраполяции соотношения Тауца $\sqrt{\alpha h\nu} = \beta(h\nu - E_g)$. Нетрудно видеть, что оптическая ширина зоны монотонно увеличивается с ростом содержания углерода в сплаве, что свидетельствует о вхождении углерода в структурную сетку по типу sp^3 гибридизации.

На полученных материалах была измерена фотолюминесценция (ФЛ). Положение пика ФЛ в функции состава также приведено на рис. 1. Из данной зависимости видно, что при значениях $X \geq 0.5$ пик ФЛ попадает в видимый диапазон. Измерения температурной зависимости интенсивности ФЛ показали, что с увеличением X ФЛ 300 К разгорается по отношению к $I_{ФЛ}$ $a-Si:H$ при 77 К. Эти результаты послужили основанием для попытки создать инжекционный светодиод видимого диапазона на базе полученных аморфных материалов. Задача разработки на этом этапе сводилась к реализации способа накачки в широкозонный слой неравновесных носителей электронов и дырок с концентрацией, достаточной для достижения уровня интенсивности электролюминесцентного излучения (ЭЛ), видимого невооруженным глазом. При этом предполагалось, что механизм ЭЛ не должен существенно отличаться от механизма ФЛ.

В качестве рабочего варианта осуществления процесса накачки был выбран механизм двойной инжекции в $p-i-n$ структуре 3. Практическая реализация этой идеи требовала разработки и создания легированных широкозонных слоев в системе $(Si-C):H$. Нами были проведены исследования по влиянию легирующих примесей

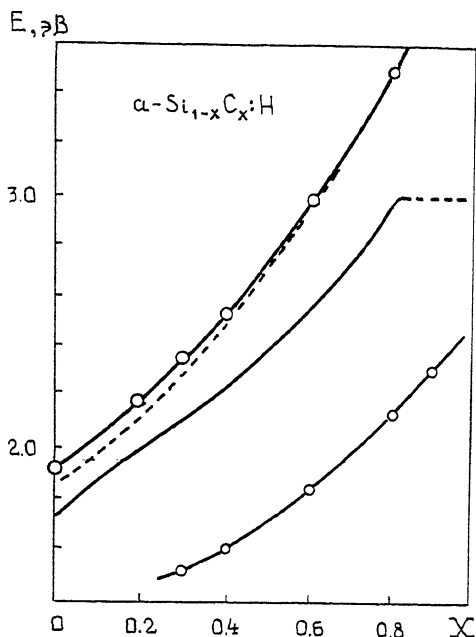


Рис. 1. Ширина оптической запрещенной зоны для аморфных сплавов $a-Si_{1-x}C_x:H$ в зависимости от X , вычисленная по уровню поглощения $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$ (верхняя кривая с точками), согласно соотношению $\sqrt{\alpha h\nu} = B(h\nu - E_g)$ (средняя сплошная кривая), данные по E_g ($\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$), согласно [2], (пунктирная кривая). Зависимость пика фотолюминесценции (нижняя кривая с точками).

p-типа - бора и n-типа - фосфора на проводимость сплавов $a-Si_{1-x}C_x:H$. Примеси вводились из газовой фазы путем добавления в собственную смесь силан-метан диборана (B_2H_6) или фосфина (PH_3). Результаты этих экспериментов приведены на рис. 2. Как показывают кривые „а“ эффект легирования имеет место, однако эффективность процесса падает с ростом X . Для повышения качества легирующих слоев мы перешли к методике роста слоев в условиях водородного разбавления, предложенной в [4]. Эффективность легирования при этом должна возрасти, т. к. сильное водородное разбавление стимулирует рост нанокристаллических кластеров, пленка приобретает микрокристаллическую структуру и процесс легирования идет в соответствии с закономерностями, характерными для кристаллов. Результат применения методики водородного разбавления иллюстрируют кривые „б“ на рис. 2. Нетрудно видеть, что проводимость легируемых μC -слоев действительно резко увеличивается для составов с $X \approx 0.3$. При больших X эффект падает. Именно μC -слои, легированные бором

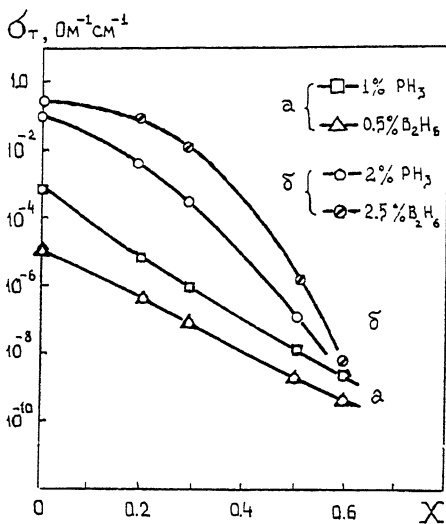


Рис. 2. Электропроводность легированных аморфных (а) и микрокристаллических (б) слоев $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ в зависимости от состава. Данные приведены для слоев толщиной 1800–2000 Å.

и фосфором с составом $X = 0.3$, были выбраны для создания $p\text{-}i\text{-}n$ структур. В итоге первый вариант инжекционного светодиода имел следующую структурную формулу:

$$\text{ITO}(700 \text{ \AA})/p^+ - \mu\text{c} - \text{Si}_{0.7}\text{C}_{0.3}\text{:H}(100 \text{ \AA})/i - a - \text{C}_{0.6}\text{Si}_{0.4}:$$

$$\text{H}(500 \text{ \AA})/n^+ - \mu\text{c} - \text{Si}_{0.7}\text{C}_{0.3}\text{:H}(250 \text{ \AA})/\text{Al};$$

где ITO – проводящий окисел индия–олова $\text{In}_x\text{Sn}_y\text{O}_z$ с поверхностным сопротивлением $\approx 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$. В скобках указаны толщины слоев, измеренные в процессе роста *in situ* лазерным интерферометром. В качестве i' -слоя выбран состав с $E_g = 2.6 \text{ эВ}$.

Для оценки инжектирующих свойств полученных структур были выполнены измерения ВАХ. Типичные ВАХ приведены на рис. 3. Если данную ВАХ аппроксимировать стандартным соотношением $I = I_s \left(e^{\frac{eV}{nkT}} - 1 \right)$, то фактор качества „ n ” оказывается для различных образцов диодов колеблющимся в пределах 7–10, что существенно превышает максимальное для диффузионного тока через $p\text{-}n$ переход теоретическое значение $n = 2$, имеющее место в условиях сильной инжекции. Этот результат свидетельствует о том, что в структурах на основе широкозонных аморфных полупроводников мы имеем дело с механизмом инжекции и токопереноса, отличным от стандартного для кристаллических полупроводников. Тем не менее эффективность инжекции следует признать все же

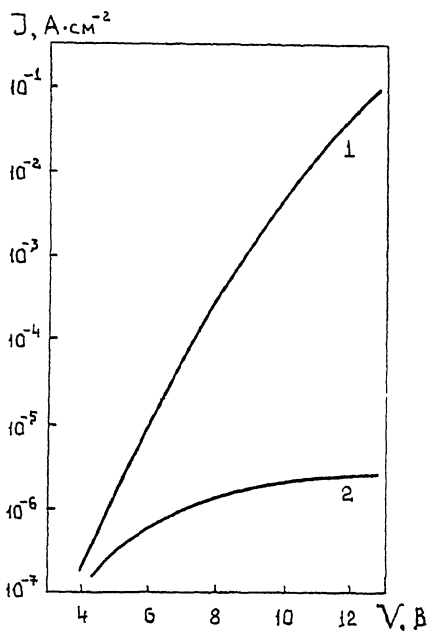


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика $p-i-n$ структуры с i -слоем на основе $a-C_{60}Si_{40}H$. 1 - прямое смещение, 2 - обратное смещение.

достаточно высокой, так как аппроксимация экспериментальных ВАХ в координатах $\log I = f(\log V)$ приводит к показателю степени m в зависимости $J \sim V^m \approx 10-15$, т.е. к значению не только существенно превышающему омическое поведение, но и много большему, чем предсказывает теорию для токов двойной инжекции ограниченных рекомбинаций в длинных диодах [3, стр. 117].

Важной особенностью наблюдаемых экспериментальных ВАХ является отсутствие заметного ограничения тока структур при максимальных токах инжекции, близких по величине к токам теплового пробоя. Это может иметь место только при отсутствии участка последовательного сопротивления в структуре и свидетельствует о том, что длины дрейфового смещения неравновесных носителей не меньше толщины i -слоя.

Инжекционные и токовые характеристики полученных $p-i-n$ структур оказались достаточными, чтобы визуально наблюдать слабую электролюминесценцию. При этом пороговый ток оказывался равным 100 mA/cm^2 . Заметим, что это значение на три порядка величины меньше типичного для светодиодов на кристаллическом карбиде кремния. Спектр излучения был измерен с помощью монохроматора ИСП-51, оснащенного фотоумножителем ФЭУ-79. Форма спектра приведена на рис. 4 в сравнении со спектром типового

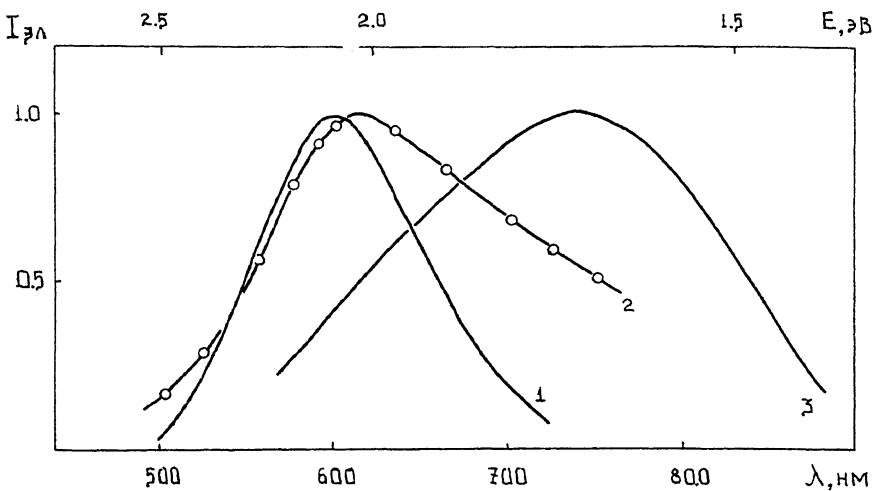


Рис. 4. Приведенные спектры электролюминесценции инжекционных $p-i-n$ светодиодов. 1 - опорная кривая светодиода на кристаллическом карбиде кремния; 2 - данные настоящей работы; 3 - данные, взятые из работы [5] для „аморфного” светодиода, полученного из смеси газов силан-ацетилен.

промышленного светодиода на кристаллическом карбиде кремния. На рис. 4 также дается спектр излучения диода на аморфном сплаве $Si-C$, полученном из смеси газов силан-ацетилен [5]. Исходя из значения порогового тока была рассчитана средняя дистанция „а” между инжектированными носителями. При этом предполагалось, что ток имеет дрейфовый характер, величина дрейфовой подвижности μ порядка $10^{-5} \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и электрическое поле распределено в i -слое однородно. Так как $n = \frac{I_{\text{пор}}}{e\mu V_{\text{пор}}}$ и $a = \frac{I}{n^{1/2}}$, то а при $V_{\text{пор}} = 10 \text{ В}$ оказывается порядка $150-300 \text{ \AA}$. Это значение примерно соответствует радиусу туннельной излучательной рекомбинации свободных электронов и дырок в аморфных полупроводниках A^{IV} [6]. Данная интерпретация, однако, не может быть принята как однозначная. При таких больших смещениях, как наблюдаемое нами пороговое 10 В , возможно проявление механизма разогрева носителей в сверхсильных полях $E = 2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ и ударной ионизации излучательных экситоноподобных центров, на наличие которых в аморфных сплавах ($Si-C$): H указывалось в работе [7].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Андреев А.А., Андреев П.А., Ханов Д., Чарыкулиев А. // Изв. АН Туркменистана. 1992. № 4. С. 100.
- [2] Soliroopoulos J., Weiser G. // J of Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 1087-1090.
- [3] Адирович Э.И., Карапеорит-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. В кн. Токи двойной инъекции в полупроводниках. М.: Сов. радио, 1978. С. 225.
- [4] Tsai C.C. Amorphous Silicon and Related Materials, v. 1, edited by H. Fritzsche, Hydrogen dilution technique for preparation of the microcrystalline layers of Si:H (World Scientific Publ., Singapore, 1989. P. 123-147).
- [5] Krangam D., Endo J., Guang-Pu W., Nonomura Sh., Okamoto H., Hamokawa Y. // J. Non-Cryst. Solids. 1985. V. 77-78. P. 1429-1432.
- [6] Tsang C., Street R.A. // Phys. Rev. 1979. V. 19. N 6. P. 3027-3041.
- [7] Васильев В.А., Волков А.С., Мусабков Е., Теруков Е.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 18. С. 1675-1680.

НПО "Солнце" Туркмении
Физико-технический институт
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
24 марта 1993 г.