

06.2; 06.3

© 1993

О ТУННЕЛЬНОМ МЕХАНИЗМЕ ИНЖЕКЦИИ И ТОКОПЕРЕНОСА В p^+iDn^+ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

Д. Ханов, А.А. Андреев,
Р.К. Мавлянов, Т. Тургунов,
А. Чарыкулиев

В [1] нами была показана возможность создания на базе аморфных широкозонных сплавов системы кремний-углерод тонкопленочных инжекционных светодиодов со структурой $p-i-n$. При этом пороговые токи $J_{пор}$ для наблюдения излучения невооруженным глазом составляли примерно 400 мА/см^2 . Несмотря на то, что это значение почти на 3 порядка величины меньше, чем $J_{пор}$ для светодиодов на кристаллическом карбиде кремния, для аморфного материала этот пороговый ток близок к критическому для теплового пробоя, который равен 2 А/см^2 . Это обстоятельство побудило нас к поиску других, более эффективных путей организации инжекции неравновесных электронов и дырок в собственный полупроводник с тем, чтобы снизить пороговый ток. Одним из возможных вариантов является инжекция горячих носителей, впервые предложенная для аморфных полупроводниковых структур в [2]. Суть идеи состоит в введении в $p-i-n$ структуру туннельно-прозрачных диэлектрических прослоек между собственным i -слоем и эмитирующими электроны и дырки легированными соответственно в n - и p -тип слоями. Падение напряжения смещения на диэлектрической прокладке V_D обеспечивает дополнительное увеличение энергии эмитируемых носителей на eV_D . Этот прирост энергии способствует увеличению длины пробега носителей в i -слое за счет их более длительной термализации и, тем самым, повышает вероятность излучательной рекомбинации свободных электронов и дырок. В настоящей работе мы выбрали именно этот путь, однако, в отличие от авторов [2], применили другой диэлектрический слой - сверхширокозонный аморфный углерод; кроме того, мы выполнили анализ ВАХ с целью подтверждения туннельного механизма инжекции в подобных структурах.

Как собственные, так и легированные слои $p-DiDn$ структуры были получены методом ультравысокочастотного плазменного разряда в газовых смесях силан-метан [3]. Для получения p, n -слоев применялись газовые легирующие добавки диборана (B_2H_6) и фосфина (PH_3), при этом для повышения эффективности легирования использовалась методика водородного разбавления [1]. D -слой выращивался из чистого метана при $T_{подл} = 230^\circ \text{C}$ при

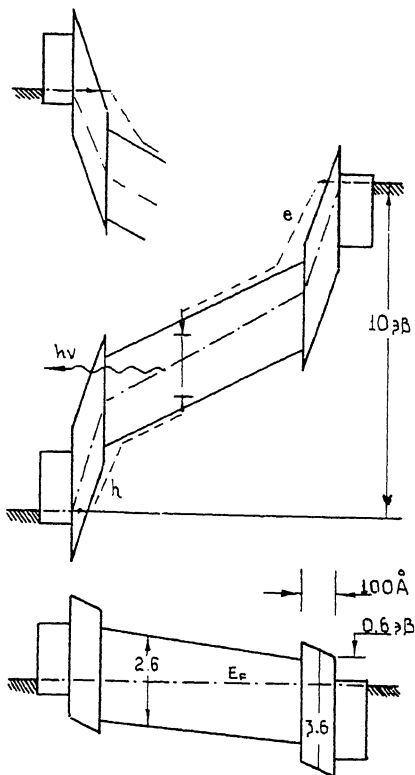


Рис. 1. Зонные диаграммы p - $DiDn$ структуры в равновесном состоянии (нижний рис.), при прямом смещении (средний рис.), p - Di - переход при обратном смещении i -слой имеет состав $\alpha - C_{60}Si_{40}:H$. D -слой - $\alpha - C:H$. Стрелками показаны туннельные переходы через контактный диэлектрик, пунктиром - движение инжектированных электронов и дырок и излучательный рекомбинационный переход.

энерговкладе в плазму $\sim 1 \text{ Вт/см}^3$ и наличии катализатора. Ширина оптического зазора D -слоя равнялась 3,6 эВ. Измерения темновой электропроводности $\alpha - C:H$, выращенного в вышеприведенных условиях показало, что его удельная проводимость почти на порядок ниже, чем собственного i -слоя, имеющего состав $C_{60}Si_{40}:H$ и ширину оптического зазора 2,6 эВ. Эти данные в совокупности с данными по толщинам слоев позволили построить ориентировочную зонную энергетическую диаграмму p - $DiDn$ диода, которая и приведена на рис. 1 для равновесного случая и для прямого и обратного смещения, равного 10 В. Из приведенных диаграмм нетрудно видеть, что диэлектрический слой при определенной величине смещения формирует управляемый напряжением

треугольный барьер, который и может выполнять функцию туннельного эмиттера горячих носителей. При этом при $V_{смещ} = 10$ В ожидаемая величина кинетической энергии эмиттируемых носителей оказывается порядка 2 эВ, что уже близко к E_g i -слоя. Из рис. 1 также следует, что фактором, определяющим эффективность инжекции, является толщина D -слоя. Для оптимизации этого параметра были изготовлены структуры с тремя значениями толщины диэлектрика 75, 150 и 300 Å.

Толщина диэлектрика в процессе изготовления задавалась по табулированной скорости роста, так как лазерный интерферометр, работающий *in situ*, не обеспечивал интерференционной картины на столь тонких слоях. Толщина i -слоя фиксировалась равной 300 Å и легированные слои имели толщину 100 Å. В качестве прозрачного электрода использовался $In_xSn_yO_2$, полученный магнетронным распылением металлической мишени в $Ar + O_2$ атмосфере. В качестве второго электрода был выбран Al .

Нагрузка полученных диодных структур током показала, что электролюминесценцию обнаруживают структуры с толщиной D -слоя 75 и 150 Å, при этом пороговый ток, определенный по появлению видимого визуально свечения, примерно одинаков для обеих структур и составляет 100 мА/см². Это значение в 4 раза меньше полученного для простейших $p-i-n$ [1], что свидетельствует об эффективности исследуемой структуры. Позиция пика излучения 2.0 эВ. Мы не заметили какого-либо существенного изменения формы спектра излучения по сравнению с наблюдаемым для $p-i-n$ структур, и поэтому не приводим его в настоящей работе, отсылая читателя к работе [1].

Принципиальный интерес представляет подтверждение именно туннельного механизма накачки светодиода, так как подробного исследования мы не встретили в литературе. Измеренные нами темновые ВАХ трех $p-DiDn$ структур приведены на рис. 2 в координатах $\log J = f(V)$. Нетрудно видеть существенные отклонения экспериментальных зависимостей от экспоненциальных, снижение наклона ВАХ и смещение в область больших смещений с увеличением толщины диэлектрика. Все эти закономерности качественно можно было бы попытаться описать в рамках известной схемы диода с длинной базой, для которого длина дрейфа несколько меньше толщины базы [4]. В этом случае сложная форма ВАХ является следствием зависимо от смещения перераспределения напряжений на областях базы и, собственно, $p-n$ перехода. Такая модель, однако, представляется маловероятной, так как нет никаких оснований предполагать жесткий баланс длины дрейфового смещения и толщины i -слоя. Если же длина дрейфа меньше толщины i -слоя, ограничение тока последовательным сопротивлением базы должно было бы приводить к достаточно резкому насыщению прямого тока, что не наблюдается на опыте. В связи со всем сказанным мы обращаемся к альтернативному варианту интерпретации ВАХ, а именно опираясь на ранее предложенную зонную диаграмму, т.е. учитывая наличие контактных барьеров, мы полагаем, что ВАХ

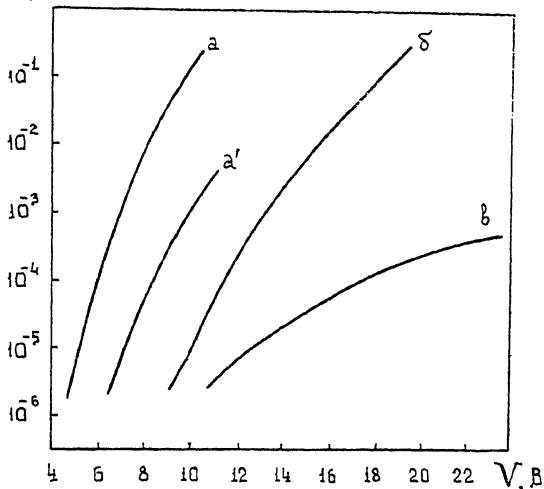
$J, \text{mA/cm}^2$ 

Рис. 2. Изменение ВАХ $p\text{-}DiDn$ диода в зависимости от толщины диэлектрического слоя: а - 75, б - 150, в - 300 Å; а' - обратное смещение. i -слой - $\alpha\text{-}C_{60}Si_{40}:H$, D - $\alpha\text{-}C:H$.

является контактно ограниченной. То есть измеряемый ток определяется исключительно инжекционными свойствами контактов - сопротивление i -слоя всегда меньше контактного и существенной роли не играет. Исходя из этого предположения, мы оценили плотность тока через контактный барьер в соответствии с термоэмиссионным и полевым туннельным механизмами. Термоэмиссионный ток $J_{\text{терм}} = J_0 \exp(-e\phi_0/kT)$ следует исключить из рассмотрения сразу же, так как он не дает зависимости от смещения. Расчет тока полевого туннелирования велся по известной формуле Фаулера-Нордгейма для идеального треугольного барьера:

$$J_T = \frac{e^2 V^2}{2\pi h (\Delta d)^2 \phi_0} \exp - \frac{4\sqrt{2m^*d}(e\phi_0)^{3/2}}{3e\hbar V},$$

где V - смещение на диэлектрике, d - толщина диэлектрика, $e\phi_0$ - высота контактного барьера.

На основе этого соотношения сравнительно легко удалось согласовать функциональную зависимость тока от напряжения для образцов с толщинами диэлектрика 75 и 150 Å при значении $e\phi_0 = 0.6$ эВ, что и соответствует зонной диаграмме. Менее удовлетворительные результаты дает подсчет абсолютной величины тока, который оказывается завышенным, однако остается в разумных пределах, так как, во-первых, речь идет о согласовании тока в пределах порядка величины, и, во-вторых, использованное нами

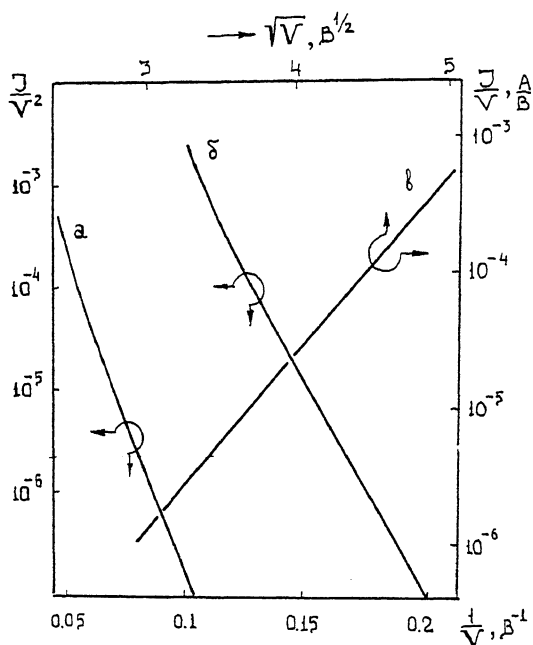


Рис. 3. ВАХ $p\text{-}DiDn$ диодов, построенные в координатах Фаулера-Нордгейма (а) и (б) и Пуля-Френкеля (в). Обозначения а, б, в соответствуют предыдущему рисунку.

соотношение Фаулера-Нордгейма относится к идеальному барьеру, для которого предполагается сохранение импульса электрона при прохождении барьера. Выполнение этого требования маловероятно для аморфных структур с флуктуирующим ионным потенциалом. Учет этого обстоятельства должен привести к снижению амплитуды туннельного тока.

Туннельный характер тока в рассматриваемых структурах подтверждается и тем обстоятельством, что в таких структурах прямая и обратные ветви ВАХ различаются незначительно, что иллюстрирует рис. 2 (см. вставку). Этот факт полностью понятен, так как при обеих полярностях смещения ток определяется контактными барьерами. При этом при обратном смещении, как это следует из диаграммы 1, мощность барьера, определяемая произведением эффективной длины на высоту, оказывается выше, что и ведет к меньшей прозрачности барьера. Соответственно, обратная ветвь всегда расположена ниже прямой в шкале токов.

Параметры ВАХ третьего образца с толщиной диэлектрика 300 \AA не могут быть описаны в рамках модели туннельных контактных токов. Но этот факт и понятен, так как туннельная прозрачность диэлектрика с толщиной 300 \AA в рассматриваемом

диапазоне смещений приближается 0. Ток через эту структуру достаточно удовлетворительно описывается законом Френкеля-Пуля для облегченной полем термоактивации эмиссионных центров. Рис. 3 иллюстрирует графически соответствие экспериментальных ВАХ рассмотренным теоретическим механизмам токопереноса через p - $DiDn$ структуры туннельно прозрачным и туннельно непрозрачными диэлектриком.

В ы в о д ы

1. Применение туннельно-тонких диэлектриков в составе p - i - n структуры на базе аморфных сплавов системы кремний-углерод повышает эффективность инжекции, что в конечном итоге приводит к снижению пороговых токов инжекционной электролюминесценции до уровня 100 мА/см².

2. Механизм токопереноса в структурах p - $DiDn$ является контактно-ограниченным и описывается моделью полевых туннельных токов через треугольный барьер в том случае, если толщина барьера не превышает 150 Å.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ханов Д., Андреев А. А., Мавлянов Р., Турсунов Т., Чарыкулиев А. // Письма в ЖТФ. 1993. В печати.
- [2] Raasche S.M., Toyama T., Okamoto K., Hamakawa Y. // IEEE Trans. on Electron Devices. 1989. V. 36. N 12. P. 3165.
- [3] Андреев А.А., Андреев П.А., Ханов Д., Чарыкулиев А. // Изв. АН Туркменистана. 1992. № 4. С. 100.
- [4] Стафеев В.И., Каракушан Э.И. В кн.: Магнито-диоды. М.: Наука, 1975. С. 27.

НПО "Солнце" Туркмении
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
24 марта 1993 г.