

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ИНЖЕКЦИОННЫХ $p-i-n$ -СТРУКТУР ИЗ $p-Ge:Hg, Sb$

¹Курмашев Ш.Д., д.ф.-м.н., профессор, ²Викулин И.М., д.ф.-м.н., профессор,

²Никифоров С.Н., аспирант, ³Софронков А.Н., д.т.н., профессор

¹Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

²Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

³Ополевицкий университет, Ополе, Польша

тел. (048)-723 61 18

Summary: The irradiation of the injection structures on the Ge:Hg, Sb base by the fast electrons is changed the degree of the compensation of the base material and the concentration of the equilibrium majority charge carriers. It leads to the change of the value of the direct current across the diode.

Германий, компенсированный ртутью, является перспективным материалом для создания инжекционных фотоприемников для ИК-области спектра [1]. Однако, до настоящего времени практически не исследовано влияние облучения на токи двойной инжекции в этом материале. Анализ воздействия облучения электронами на электрофизические характеристики диодов с длинной базой дает возможность судить о влиянии радиации на параметры и характеристики таких структур, а также уточнить роль тех или иных примесей и дефектов в механизмах протекания токов двойной инжекции. Такого рода исследования дают возможность определить степень устойчивости инжекционных фотоприемников к воздействию облучения, а также определяют возможность управления их характеристиками [2].

Цель настоящей работы - исследование влияния электронного облучения на инжекционные структуры из $p-Ge:Hg, Sb$. Электронное облучение выбрано потому, что для германия, при этом, эффективность дефектообразования существенно выше, чем у γ -квантов. Длина базы диодов d значительно превышала эффективную длину носителей заряда, т.е., в данном случае, реализовался преимущественно дрейфовый перенос носителей заряда [3]. Плотность дислокаций в материале базы не превышала $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Большая плотность дислокаций, которые являются стоком радиационных дефектов [4], может влиять на процессы взаимодействия этих дефектов с примесями материала базы. Образцы облучались электронами с энергией 5.0 МэВ на линейном ускорителе "Электроника" (институт ядерных исследований НАН Украины, г. Киев). Температура образцов при облучении была близка к комнатной.

Известно, что часть дефектов Френкеля, которая не прореагировала со ртутью или сурьмой, увеличивает концентрацию рекомбинационных центров. Поскольку температура отжига дефектов радиационного происхождения ($\sim 600 \text{ K}$) значительно ниже температуры восстановления примесных атомов в электрически активном состоянии ($\sim 750 \text{ K}$) [5], для выделения влияния электронного облучения на примеси ртути и сурьмы, после облучения образцы нагревали до 650 K и медленно охлаждали.

Наряду с диодными структурами изучались эквивалентные резисторы, имеющие те же размеры, что и база диодов, но с неинжектирующими (омическими) контактами. На рис. 1 приведены снятые при $T=55 \text{ K}$ вольт-амперные характеристики (ВАХ) одного из образцов до и после облучения. ВАХ диода описывается соотношением $I \sim I_0^n$, где $n=2$, ВАХ эквивалентного резистора линейна. Концентрация электрически активных атомов ртути N_{Hg} , компенсирующих мелких доноров N_{Sb} , а также радиационных дефектов, определялась путем сравнения экспериментальных зависимостей $p=f(T)$ и рассчитанными по уравнению электронейтральности с помощью итерационной процедуры [6]. При этом использовались величины энергии ионизации для ртути в германии, приведенные в [7].

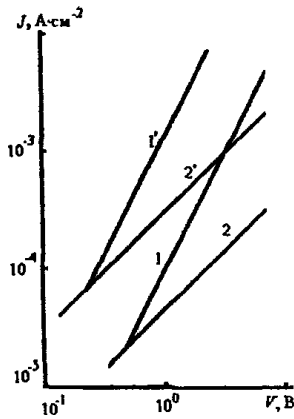


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики инжекционного диода (1, 1') и эквивалентного резистора (2, 2') до (1, 2) и после (1', 2') облучения.

Прямые ветви необлученных диодов обсуждались в [1]. Рассмотрим, как изменились характеристики в результате облучения электронами. Для группы образцов концентрация электрически активной ртути в результате облучения уменьшилась в 2.5 раза, концентрация сурьмы – почти в 17 раз. Это вызвало снижение степени компенсации материала базы диода почти в 8 раз и увеличение равновесной концентрации дырок почти в 12 раз. При уменьшении концентрации сурьмы увеличивается доля ноль-зарядных атомов ртути, в результате чего эффективнее происходит перезарядка их инжекционным током. При этом возрастает (хотя и незначительно) время жизни дырок, а соответственно и биполярная подвижность. Это проявляется в некотором увеличении показателя n в соотношении для ВАХ.

Вследствие того, что после облучения концентрация ртути в базе диода изменилась, должно измениться и время жизни неосновных носителей заряда τ_n . Определенные экспериментально значения хорошо совпадают с рассчитанными. Таким образом, имеется возможность приблизительно оценить концентрацию ноль-зарядных атомов ртути независимыми методами. При низкой температуре (с учетом концентрации мелких донорных уровней ртути N_{Sb}) это приблизительно концентрация электрически активных атомов ртути вообще, поскольку примесь вся свободна от электронов. В работе изучено влияние поверхностной рекомбинации на величину эффективной длины диффузии электронов L_n .

Изменения электрофизических свойств диодов на основе $p^+p^-n^+$ -структур из p -Ge:Hg, Sb, наступившие в результате облучения быстрыми электронами, можно объяснить, учитывая влияние облучения на свойства базы этих диодов. При облучении германия электронами образуются первичные радиационные дефекты – пары Френкеля (вакансия V плюс собственный междоузельный атом германия I). При облучении при $T=300$ К пары Френкеля нестабильны и они либо взаимно рекомбинируют, либо разделяются на изолированные V и I . В работе [8] оказано, что изолированная вакансия в германии может находиться в двух зарядовых состояниях – V^0 и V^- . Акцепторное состояние вакансии расположено вблизи $E_v+0.2$ эВ и доминирует в облученном электронами Ge:Hg. Собственные междоузельные атомы в материале p -типа находятся, по-видимому в заряженном состоянии.

Характер изменения концентрации равновесных дырок для диода с исходной степенью компенсации 0.2 аналогичен для образцов с неинжектирующими контактами. По порядку величины совпадают в результате облучения скорости удаления ртути $dN_{Hg}/d\Phi$,

сурьмы $dN_{Sb}/d\Phi$ и скорости введения дырок $dp_0/d\Phi$. Такое поведение концентрации дырок обусловлено процессами захвата пар Френкеля на атомы донорной и акцепторной примеси, приводящими к нейтрализации электрически активных атомов сурьмы и ртути. У образцов с одинаковым содержанием ртути скорость удаления состояний ртути 0.087 эВ возрастает при увеличении содержания сурьмы. Такое поведение $dN_{Hg}/d\Phi$ можно объяснить, если принять, что при облучении атомы сурьмы могут связываться в комплексы "сурьма-четыре вакансии". При большой концентрации сурьмы свободные вакансии образуют нейтральные комплексы с атомами Sb (т.е. сурьма становится электрически неактивной) и в меньшей степени аннигилирует с междоузельными атомами германия, которые имеют возможность вытеснить ртуть с междоузлия, делая ее электрически нейтральной. При уменьшении концентрации сурьмы, доля вакансий, идущих на аннигиляцию, увеличивается и, соответственно, уменьшается число междоузельных атомов германия.

Наблюдаемые при $T=55 \text{ К}$ изменения концентрации равновесных дырок связаны, по-видимому, главным образом с уменьшением концентрации сурьмы в электрически активном состоянии вследствие образования комплексов "вакансия-донор". По абсолютной величине $dN_{Hg}/d\Phi$ превышает скорость удаления сурьмы $dN_{Sb}/d\Phi$. Это связано с тем, что исходная концентрация ртути намного больше исходной концентрации сурьмы. Для исследованных образцов концентрация сурьмы уменьшилась во всех случаях более, чем в 10 раз, в то время как N_{Hg} изменилась в 2...3 раза.

Заметного изменения подвижности электронов и дырок в базе диодов в результате облучения обнаружено не было. По-видимому, оно мало и им можно пренебречь. При преимущественном рассеянии носителей на нейтральных атомах ртути изменение подвижности невелико, концентрация же сурьмы мала для того, чтобы рассеяние на атомах Sb было сколь-нибудь заметным. Возрастание рассеяния носителей на радиационных дефектах, по-видимому, компенсирует незначительное изменение подвижности, которое могло иметь место из-за уменьшения концентрации ртути.

Выводы. В работе показано, что облучение инжекционных структур на основе $p\text{-Ge:Hg}$, Sb быстрыми электронами изменяет степень компенсации материала базы и концентрацию равновесных основных носителей заряда, что приводит к изменению величины прямого тока через диоды.

Литература

1. Kurmashev Sh., Stafeev V., Vikulin I., Sofronkov A. Injection-amplification IR-photodiodes // Proc. of SPIE.-1997.- Vol.3182.- P. 59-67.
2. Kurmashev Sh., Vikulin I., Nikiforov S. Influence of electron irradiation on characteristics of $p\text{-InSb}$ injection photodiodes // Photoelectronics.-2006, N15.- P.63-64.
3. Курмашев Ш.Д., Викулин И.М. Феноменологический анализ инжекционного усиления в $p\text{-i-n}$ -структурах // Тр. IX МНПК ССПОИ-2005.- 2005.- С.39-41.
4. Мамонтов А.М., Барышев Н.С., Полозова Е.И. Влияние золота на радиационное дефектообразование в германии, легированном цинком и ртутью ФТП, 1979.- Т.13, в.12.- С. 2417-2420.
5. Васильев А.В., Рыбакова А.А., Смирнов А.С. о центрах аннигиляции радиационных дефектов ФТП, 1972.- Т. 6, в. 4.- С. 733-734.
6. Touma M., Unno K., Least squares analysis of Hall date and donor levels in gallium phosphide Jap. J. Appl. Phys., 1969.- V.8, N9.- P. 1118-1126.
7. Родо М. Полупроводниковые материалы. – М.: Металлургия, 1979.- 3303 с.
8. Васильева Е.Д., Гончаров Л.А. Радиационные дефекты в германии, легированном медью ФТП, 1981.- Т. 15, в. 7.- С.1259-1263.

Рецензент: д.т.н., профессор Борщ В.И.