Известия НАН Армении, Физика, т.31, Nº 1, с. 33-40 (1996)

УДК 621.315.592

К ВОПРОСУ О ФОТОПРОВОДИМОСТИ n⁺-n-n⁺- СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЦИНКОМ

Ю.А.АБРАМЯН,

ИРФЭ НАН Армении

В.М.АРУТЮНЯН, Ф.В.ГАСПАРЯН

Ереванский государственный университет (Поступила в редакцию 7 сентября 1995 г.)

Исследованы электрофизические и фотоэлектрические характеристики n⁺-n-n⁺- структур из кремния, легированного цинком. Обсуждаются технологические особенности изготовления, а также физические механизмы образования N-образного участка на прямой ветви ВАХ и высокой фоточувствительности этих структур.

1. Введение

Разработка высокочувствительных фотоприемных устройств, работающих в спектральных окнах прозрачности атмосферы, обеспечила современные достижения ИК-систем дистанционного зондирования [1,2]. Для окон прозрачности атмосферы $\lambda = 0,95-1,05$ мкм и 1,2-1,3 мкм, на наш взгляд, наиболее перспективными с точки зрения высокой чувствительности (D*>10¹² смГц^{1/2}Вт⁻¹ при 300 K) представляются кремниевые S-диодные структуры [3-10], а также кремниевые структуры типа n⁺-n-n⁺ и p⁺-p-p⁺ с базой, легированной цинком [7,11-13].

Первые измерения обнаружительной способности D* Sдиодов на основе Si<Zn> при азотных температурах проведены в работе [8]. Полученные высокие значения D*=10¹³ смГц^{1/2}Вт⁻¹ были объяснены релаксацией пространственного заряда в результате оптической генерации электронно-дырочных пар B условиях зарядом ограничения протекающего B і-базе тока объемным инжектированных носителей. В [4,6,7] показано, что в S-диодах из пкремния с цинком наиболее полно экспериментальным результатам удовлетворяет решение задачи в приближении квазинейтральности, но при этом с ростом инжекции время жизни неосновных носителей

33

τ_p вначале убывает, а затем растет до значений τ_{ps}=τ_n Высокая фоточувствительность определяется внутренней обратной связью по току [4,7,9,10]. При этом освещение базы из области собственного поглощения вследствие фотоэффекта приводит к перераспределению напряжения в диоде и к увеличению инжекции, вследствие чего в рассматриваемых структурах имеет место внутреннее инжекционное усиление фототока.

В структурах типа n⁺-n-n⁺ (p⁺-p-p⁺) наиболее высокая фоточувствительность наблюдается в структурах с п-базой. Подобные структуры реализуются, если концентрация введенных атомов цинка No удовлетворяет условию No<No<2No (No - концентрация донорных центров в исходном п-материале). При таком легировании нижний уровень цинка Ev+0,31эВ полностью заполнен электронами, а верхний (двухзарядный) уровень Ес-0,55 эВ заполнен частично. Кроме того, почти во всех работах по исследованию n+-n-n+-структур было замечено наличие более высоких электрических полей на одном из п+-п-контактов, т.е. характеристики не всегда являлись симметричными [11], что приводило к неоднозначной интерпретации ВАХ. Вероятнее всего, на наш взгляд, такое явление связано с образованием дефектов в процессе получения контактов при сплавной технологии. Как известно, при создании электронно-дырочного перехода методом сплавления на поверхность кремния помещается контактный материал, содержащий соответствующую легирующую примесь. В результате нагрева в вакууме происходит растворение кремния в контактном материале. Во время последующего охлаждения растворенный кремний рекристаллизуется обратно, захватывая примесь из электродного материала. При быстром охлаждении, вслед за началом образования рекристаллизованного слоя, по всей массе исходного контактного материала происходит образование устойчивых зародышей кристалла И рекристаллизованный слой будет неравномерно легированным, узким и неоднородным, что может явиться причиной высокого сопротивления контактов, т.к. уже образуются неомические контакты.

2. Технология изготовления структур

Целью настоящей работы является исследование фотопроводимости n⁺-n-n⁺-структур, сублинейности и N-образности на ВАХ. В качестве исходного материала был использован кремний марки БКЭФ с удельным сопротивлением р~10-20 Ом-см. Исходная толщина пластин составляла 550-600 мкм. Пластины кремния после шлифовки, травления, промывки в деионизованной воде и сушки вместе с навеской цинка (40-50 миллиграмм) запаивались в ампулы из оптически чистого кварца при вакууме ~10⁻⁵ мм Hg. Внутренние стенки ампул предварительно обрабатывались в смеси HF+HNO3 (1:1) с последующей промывкой и сушкой. Отпайка ампул проводилась в процессе откачки. Ампулы помещались в печь, температура в которой в течение 1-1,5 часа поднималась до 1050°С. Диффузионный отжиг при этой температуре длился 3-4 часа. После. диффузии пластины с обеих сторон сошлифовывались на глубину 40-50 мкм, проводилось травление в HF+HNO₃ (1:3) в течение нескольких минут с последующей промывкой и сушкой при 100°С. Удельное сопротивление легированного материала, измеренное четырехзондовым методом, составляло 10-20 кОм-см при 300 К. Далее из компенсированного материала методом скрайбирования нарезались пластины размерами 1,5х2 мм, И после кратковременного обезжиривания в кипящем толуоле и последующей промывки и сушки, к торцам пластин в вакууме ~ 10⁻⁵ мм Нд вплавлялись контакты из сплава Au+0,1% Sb. Вплавление проводилось в графитовой кассете при температуре 620-650°С в течение нескольких минут с последующим более длительным охлаждением (20-30 мин). Размеры фотоприемной площадки единичных элементов равнялись A=k/=1,5×1мм² (к-ширина, /-длина элемента). Измерения ВАХ проводились на характериографе марки TR-4805.

3. Результаты измерений и обсуждение

На рис.1 показана ВАХ для одного из образцов при 300 К и 78 К в темновых условиях и при освещении образца. Как видно из

35

рисунка, при температуре образца 78К и при напряжении на структуре ~ 40 В отношение светового тока (при освещении фоновым излучением комнаты T_{Φ} ~300 К) к темновому I_{Φ}/I_{T} равно 10^3 Рассматриваемые структуры по чувствительности не уступают Sдиодным структурам, легированным цинком. Отметим, что подобные ВАХ были получены и на образцах, где была осуществлена замена контактного материала Au+0,1% Sb на Sn+8% Sb. При этом ВАХ структур были также симметричными, но несколько уступали в величине фоточувствительности. Исследования с использованием различных контактных материалов показали, что высокая фоточувствительность наблюдается только при отсутствии скольнибудь заметного падения напряжения на контактах. На наш взгляд, наблюдаемые в структурах высокие значения фоточувствительности должны определяться спецификой глубоких центров цинка в кремнии. Из-за того, что сечение захвата дырок на верхний уровень цинка значительно больше сечения захвата электронов (σ./σ.≥10³ [4,7,11]), можно принять, что при освещении образца из области собственного поглощения, дырки мгновенно захватываются на глубокие центры, и фотопроводимость в n+nn+-структурах будет в основном монополярным током электронов определяться (см., например, [4,14]):

$$I_{\phi} = e \hat{Q}_{o} A \eta t / \tau_{n} = (e P / h v) \eta t / \tau_{n} , \qquad (1)$$

где $t = d/\mu_n E \approx d^2/\mu_n V$ есть время пролета электронов через n-базу, $\eta = \alpha \beta_0 (1-R)(1-e^{-\alpha d})$ есть квантовая эффективность, Q_0 [фотон/см²·c] плотность потока фотонов, А—светочувствительная площадка, Р—мощность излучения, hv—энергия кванта, μ_n —подвижность электронов, α —коэффициент поглощения, β_0 —число поглощенных фотонов, R—коэффициент отражения, d—толщина базы. Если принять, что N₀=Ng и $\sigma_n \approx 10^{-17} \text{ см}^2$ [7,11], то $\tau_n \approx 1/\sigma_n v_n N_0 \approx 10^{-4}$ с. Тогда время пролета электрона между контактами при d=0,1см, v=40B и $\mu_n \approx 10^3$ см²/B-с равняется $t \approx 2,5 \cdot 10^{-7}$ с. Поэтому коэффициент



Рис. 1. ВАХ n⁺-n-n⁺- структур (Si<Zn>):

- ВАХ при температуре образца 300К (Тфона=300К, I=20 мкА/дел).
- 2-4. ВАХ при температуре образца 78 К :
- 2. Тфона = 300 К, I = 5 мА/дел, Q0фона < 10¹⁴ фотон/см²-с.
- 2'. Закрытый фон , I = 5 мА/дел.
- .3. Фон закрыт черной бумагой, I = 20 мкА/дел. Это ВАХ 2', развернутая по току.
 - 4. Частично закрытый фон , I = 20 мкА/дел.

Приведенное значение G носит оценочный характер и относится к случаю малых уровней освещенности при относительно малых значениях приложенного напряжения, поскольку в рассматриваемых структурах возможно изменение τ_n в связи с ростом сечения захвата электронов σ_n в сильных полях и при изменении уровня освещения.

С помощью прибора UMO-2 было оценено, что плотность потока фонового излучения комнаты составляла 10^{-4} BT/см². Учитывая, что активная фоточувствительная плошадка элементов A=1,5·10⁻² см², мощность излучения, падающего на структуру, примерно равна 10^{-6} . Вт. Следовательно, при смещениях на элементе ~40 В (см. рис.1) токовая чувствительность S₁ = 4,5·10⁴ A/BT.

Что касается наблюдаемых закономерностей на ВАХ, то до сих пор отсутствует единое мнение относительно механизма образования сублинейности и N-образности в исследуемых структурах. Так, в [13, 15] наличие сублинейности на темновой ВАХ связывается с эффектами эксклюзионного обеднения у анодного n⁺-n-перехода и наличием встречных диффузионно-дрейфовых потоков носителей заряда в базе. Эти эффекты обычно приводят к экспоненциальной зависимости приложенного напряжения от тока, т.е. V ~ exp(jad), где "a"- некоторая постоянная. В нашем случае ($L_n << 1$, L_n -диффузионная длина электронов) в темновых условиях до участка с ОС наблюдалась закономерность (см. кривую 3 на рис.1) j~V^m, где 0<m<1.

В [11,16] нелинейность и N-образность ВАХ при освещении связывается с ростом сечения захвата электронов на верхний уровень цинка и уменьшением времени жизни в сильных полях, в то время как в [13]— с тепловым гашением фоточувствительности.

В отличие от предыдущих работ нами наблюдалась N-образность ВАХ и в отсутствие освещения (кривые 2' и 3). Нелинейность ВАХ в темноте начинает заметно сказываться при полях $E=V/d>40/10^{-2}$ (B/cm)=4-10³ B/cm. Известно, что при таких полях сечение захвата электронов σ_n в Si<Zn> резко возрастает, а подвижность падает [4,7,9]:

$$\sigma_n \sim (E/E_r)^q$$
 и $\mu_n \sim (E_n/E)^g$.

Здесь E_{T} и E_{n} - некоторые нормировочные постоянные. Для Si<Zn> 0<q<1 и 0<g<1.

В результате резко может увеличиться захват электронов на верхний уровень цинка, что приведет к уменьшению времени жизни и концентрации электронов. Поэтому рост тока с увеличением приложенного напряжения может замедлиться, а на ВАХ может сформироваться участок сублинейности. Дальнейшее уменьшение τ_n (возможно, и μ_n) и рост σ_n приведет к формированию ОС N-типа. Именно такой механизм формирования сублинейности ВАХ приводит к степенной зависимости тока от напряжения.

При освещении, когда плотность потока фотонов приближается к концентрации глубоких центров $(Q_0 \sim 10^{14} \text{ фотон/см}^2 \cdot \text{с})$, освещение действует эквивалентно инжекции (τ_p растет) и фотопроводимость будет определяться как электронами, так и

38

дырками. При этом сублинейность ВАХ исчезает и о_n начинает зависеть от уровня интенсивности освещения [4,7], т.е.

 $\sigma_n \sim (E/E_T) q + \varphi Qo$,

где ф-некоторая постоянная.

Таким образом, при освещении рост σ_n усиливается и Nобразность на ВАХ наблюдается при меньших полях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Левинстейн, Дж. Мадлер. ТИИЭР, 63, 6 (1975).

- 2. Дж. Гауэр. Оптическая связь. М., Радио и связь. 1989.
- 3. Э.Г. Мирзабекян, Ю.А. Абрамян, З.Н. Адамян, В.М. Арутюнян, Р.Г. Симонян. ДАН Арм ССР, 64, 285 (1977).
- 4. В.М.Арутюнян. Генерационно-рекомбинационные эффекты и двойная инжекция в полупроводниках. Ереван, Изд. АН Арм ССР, 1977, 322с.
- 5. Э.Г.Мирзабекян, Р.Г.Симонян, А.Абрамян. ПТЭ, N 5, 221 (1976).
- 6. Г.М.Авакьяни, Ю.А.Абрамян. Изв. АН Арм ССР, Физика, 4, 386 (1969).
- 7. Ф.В.Гаспарян, З.Н.Адамян, В.М.Арутюнян. Кремниевые фотоприемники. Ереван, изд. ЕГУ, 1989, 362.
- 8. A.Maher, B.G.Streetman, N.Holonyak. IEEE Trans. , ED-16, 963 (1969).
- В.М.Арутюнян. Микроэлектроника, 11, 539 (1982).
- 10. Б.М.Гарин, В.И.Стафеев. ФТП, 6, 78 (1972).
- 11.А.А.Лебедев, Н.А.Султанов, А.Т.Касымов. В кн.: "Проблемы диэлектрической электроники" (под ред. С.А.Азимова). Ташкент, ФАН, 1974, с. 235-240.
- 12. Х.М.Абдураимов, Д.А.Аронов, П.Н.Книгин, Ю.С.Королев, С.В.Торосян. В кн.: "Физические явления в полупроводниках с глубокими уровнями и оптоэлектроника". Ташкент, ФАН. 1977, с. 24-31.
- 13. Г.Э.Петрушина, В.И.Шопен. ФТП, 9, 578 (1975).
- R.H.Kingston. Detection of optical and infrared radiation. Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 1978.
- П.М.Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю.Лейдерман. Фотопроводимость полупроводниковых структур с глубокими примесями. Ташкент, ФАН, 1981, 199с.
- 16. Б.В.Корнилов, А.В.Анфимов. ФТП, 1, 340 (1967).

ON PHOTOCONDUCTIVITY OF n+-n-n+-STRUCTURES MADE OF SILICON DOPED WITH ZINC

YU.A.ABRAHAMIAN, V.M.AROUTIOUNIAN, and F.V.GASPARIAN

We investigated electrophysical and photoelectrical characteristics of n⁺-nn⁺-structures made of silicon doped with zinc. We discussed technological peculiarities of the structures preparation as well as physical mechanisms of a formation of a Ntype region on the direct branch of the current-voltage characteristics and high photosensitivity of such structures.

ՅԻՆԿՈՎ ԼԵԳԻՐԱՅՎԱԾ ՍԻԼԻՅԻՈՒՄԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՍՏԵՂԾՎԱԾ ոո⁺ -ո -ո⁺-ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ ՖՈՏՈՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՐՅԻ ՇՈՒՐՋԸ

ՅՈՒ.Ա. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ֆ.Վ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Հետազոտված են ցինկով լեզիրացված սիլիցիւմային ո+-ո-ո⁺ կառուցվածքների էլեկտրաֆիզիկական և ֆոտոէլեկտրական հատկությունները։ Քննարկված են կառուցվածքների պատրաստման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները և վոլաամպերային բնութագրի ուղիղ ճյուղի վրա N-աետակի տիրույթի առաջացման և թարձր ֆոտոզգայունության ֆիզիկական մեխանիզմները։