

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

А. С. ПОГОСЯН

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ
НА ОСНОВЕ РАЗОГРЕВА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ТОНКИХ
ПЛЕНКАХ ВИСМУТА

Исследование разогрева носителей заряда в тонких пленках, помимо чисто физического, представляет и практический интерес для создания чувствительных приемников электромагнитного излучения. Первые результаты по детектированию излучения 3 см и 8 мм диапазонов длин волн [1] показали принципиальную возможность и перспективность использования нелинейных свойств пленок висмута для создания тонкопленочных (ТП) активных приборов, имеющих высокую граничную частоту, малую инерционность и не уступающих по простоте пассивным ТП элементам. Однако, экспериментально полученные значения параметра неомичности, характеризующего отклонение от закона Ома, и вольтваттной чувствительности ТП детекторов были на 1—2 порядка ниже теоретических оценок. Дальнейшие исследования нелинейных свойств пленок висмута различной толщины в широком диапазоне температур показали [2], что причиной такого несоответствия расчетных и экспериментальных значений параметра неомичности является наличие неупругих поверхностных механизмов рассеяния носителей.

В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния толщины пленки, степени неупругих поверхностных механизмов рассеяния, температуры решетки и величины электрического поля на основные параметры ТП детекторов: вольтваттную и предельную чувствительность, инерционность.

1. Вольтваттная и предельная чувствительность

Предположим, что излучение поступает на приемную поверхность площадью $S = bl$, где b — ширина, l — длина пленки, и распространяется в направлении перпендикулярно плоскости пленки. Вольтваттная K и предельная $P_{\text{пр}}$ чувствительности ТП детекторов на основе эффекта разогрева носителей определяются аналогично чувствительностям объемного детектора [3], и при условии, что последовательно с детектором включено большое сопротивление (режим постоянного тока), равны:

$$K = \frac{\rho_{нл} E \zeta \gamma}{bd \sigma_{нл} (1 - 2\beta_{нл} E^2)} \quad (1)$$

$$P_{np} = \frac{\sqrt{3kTbdI \sigma_{нл}}}{\rho_{нл} E \zeta \gamma} (1 - 2\beta_{нл} E^2) \quad (2)$$

где d — толщина пленки; $\sigma_{нл}$ — электропроводность пленки в сильном электрическом поле E ; $\beta_{нл} = \frac{d\sigma_{нл}}{\sigma_{нл} d E^2}$ — параметр неомичности; T — рабочая температура; k — постоянная Больцмана; ζ — коэффициент, учитывающий форму модуляции приемного сигнала ($\zeta \sim 0,3 - 0,5$); γ — доля поглощенной мощности в пленке на частоте принимаемого излучения.

Из выражений (1), (2) следует, что вольтвагтная и предельная чувствительности ТП детекторов непосредственно связаны с параметрами неомичности и являются сложной функцией толщины пленки, т. е. $\beta_{нл}$, а также $\sigma_{нл}$ в условиях выполнения классического размерного эффекта сами являются функцией толщины пленки [2]. Для случая невырожденного электронного газа и при $dl_p \ll 1$ (l_p — длина свободного пробега носителей в объемном образце) параметр неомичности определяется выражением [2, 4]

$$\beta_{нл} = \beta_0 \frac{hd(\alpha + 3)}{3[2\alpha + hd(\alpha + 2)]^2} \quad (3)$$

где

$$\beta_0 = \left(\frac{e}{kT}\right)^2 \frac{d}{12h} \ln \frac{2l_p}{d} \quad (4)$$

параметр неомичности и отсутствие неупругих поверхностных механизмов рассеяния; $\alpha = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{m\bar{v}}{2\epsilon T}}$ — безразмерный параметр, характеризующий неупругое рассеяние носителей на поверхности; \bar{v} — скорость релаксации энергии носителей на поверхности; $\nu = \frac{8\pi m s^2}{3kT l_p}$; e , m — заряд и эффективная масса электрона; s — скорость звука.

В области теплых электронов можно принимать: $\sigma_{нл} \approx \sigma_{нл}^0$ ($\sigma_{нл}^0$ — омическая проводимость пленки, определяемая известными выражениями Фукса), $2\beta_{нл} E^2 \ll 1$, а отношение $\rho_{нл}/\sigma_{нл}$ практически не зависит от толщины. Тогда, совместно решая (1) — (4), получаем:

$$K/K_0 = P_{np}/P_{np0} = \frac{hd(\alpha + 3)}{3[2\alpha + hd(\alpha + 2)]^2} \quad (5)$$

где

$$K_0 = \frac{\rho_{нл} E \zeta \gamma}{bd \sigma_{нл}}; \quad P_{np0} = \frac{\sqrt{4kTbdI \sigma_{нл}}}{\rho_{нл} E \zeta \gamma} \quad (6)$$

вольваттная и предельная чувствительности ТП детекторов в отсутствие неупругих поверхностных механизмов рассеяния ($\alpha = 0$).

Независимо от величины α , увеличение электрического поля и понижение температуры приводят к увеличению вольваттной и уменьшению предельной чувствительностей, что обусловлено увеличением энергии электронов, приобретаемой на длине свободного пробега. При преобладающем рассеянии энергии носителей в объеме пленки ($\alpha \ll hd$) существует размерный эффект вольваттной и предельной чувствительностей, проявляющийся в увеличении K и уменьшении $P_{\text{пр}}$ с уменьшением толщины пленки, и обусловленный увеличением поглощенной в пленке мощности СВЧ. В этой области K и $P_{\text{пр}}$ практически не зависят от α и определяются выражениями (6). Увеличение скорости поверхностной релаксации энергии носителей приводит к уменьшению эффективности разогрева в объеме пленки (электроны начинают охлаждаться уже на поверхности), и следовательно, к уменьшению K и увеличению $P_{\text{пр}}$. При этом меняется и характер толщинной зависимости K и $P_{\text{пр}}$. При преобладающем рассеянии энергии носителей на поверхности ($\alpha \gg hd$) размерный эффект вольваттной чувствительности исчезает, а предельная чувствительность увеличивается с уменьшением толщины пленки. В этом случае $K \approx k_0 hd / 2\alpha \ll K_0$; $P_{\text{пр}} \approx P_{\text{пр}}^0 \cdot 2\alpha / hd \gg P_{\text{пр}}^0$. При $\alpha \gg hd$ носители всю приобретенную от электрического поля энергию отдают поверхности, не успевая достаточно разогреваться в объеме пленки. Выражения (5), (6) позволяют по экспериментальным результатам толщинной зависимости вольваттной чувствительности определить скорость поверхностной релаксации энергии носителей.

2. Инерционность ТП детектора

Инерционность детекторов на основе разогрева носителей заряда определяется временем релаксации электронов по энергии τ , равным [5]:

$$\tau = \frac{C}{\frac{dQ}{dT}}, \quad (7)$$

где C — теплоемкость электронов, для невырожденного электронного газа $C = \frac{3}{2} nkT_e$; T_e , n — температура и концентрация электронов; Q — средняя энергия, теряемая электронами при рассеянии. При наличии неупругих поверхностных механизмов рассеяния

$$Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{поп}}, \quad (8)$$

где

$$Q_{\text{в}} = \frac{8ms^2n(T_e - T)}{T_e} \cdot V \sqrt{\frac{2kT_e}{\pi m}} \quad (9)$$

средняя энергия, передаваемая электронами решетке при рассеянии на акустических фононах [4]: $Q_{\text{лов}}$ — средняя энергия, теряемая электронами при рассеянии на поверхности, для которой (с учетом граничных условий отдачи энергии электронов на поверхности [2]) можно записать:

$$Q_{\text{лов}} = \frac{nk_T(T_e - T)}{d} \quad (10)$$

Подставляя (8) в (10) и (7) при $T_e \approx T$ (теплые электроны), получаем:

$$\tau = \left(\frac{16s^2}{3l_p} \cdot \left[\sqrt{\frac{2m}{\pi kT}} + \frac{2\tau}{3d} \right] \right)^{-1} \quad (11)$$

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Экспериментально исследовалась вольтваттная чувствительность ТП детекторов на основе пленок висмута толщиной 1200—1800 Å в 8 мкм и 4 мкм диапазонах длин волн при температурах 300 К и 78 К. Пленки готовились в ФТИНТ АН УССР методом испарения и конденсации висмута в вакууме ($\sim 10^{-7}$ тор) на свежий скол слюды. Подвижность электронов в исследованных пленках составляла (0,26—0,46) $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 300 К и (0,64—1,44) $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 78 К. Параметр неомичности в зависимости от толщины пленки составлял (0,5—3,4) $10^{-8} \text{ м}^2/\text{В}^2$ при 300 К и (0,1—1,5) $10^{-7} \text{ м}^2/\text{В}^2$ при 78 К.

Пленка располагалась в центре волновода в максимуме напряженности электрического поля волны. С целью исключения нагрева кристаллической решетки сильное электрическое поле в пленке создавалось короткими импульсами напряжения длительностью 10^{-6} с и частотой следования 400 Гц. Вольтваттная чувствительность определялась как расчетным путем по формуле $K = U/P_{\text{пад}}$ по известным величинам напряженности протектированного сигнала U и падающей мощности $P_{\text{пад}}$, так и сравнением с чувствительностью калиброванного стандартного детектора. В обоих случаях результаты в пределах погрешности измерений ($\pm 10\%$) совпадали. Величина протектированного сигнала не зависела от полярности напряжения смещения, что исключает ошибки, связанные с возможным наблюдением эффекта детектирования на случайных контактах.

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость вольтваттной чувствительности ТП детектора от величины электрического поля. Там же приведена зависимость $K = f(E)$, рассчитанная по формуле (11) по экспериментальным значениям параметра неомичности для той же пленки. При постоянном значении E понижение температуры до 78 К приводит к увеличению чувствительности в 2—3 раза. Измерение K для одной и той же пленки в диапазонах длин волн $\lambda = 8 \text{ мкм}$ и

$\lambda = 4$ м показали, что чувствительность практически не зависит от частоты падающего излучения. Предельная частота ТП детекторов определяется частотной зависимостью электропроводности пленки и в зависимости от толщины пленки составляет величину порядка $5 \cdot 10^{13} - 10^{14}$ Гц.

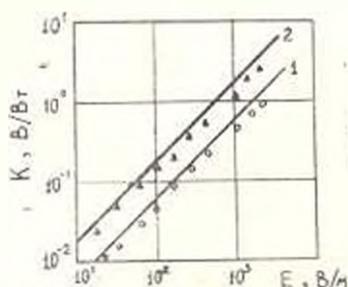


Рис. 1. Зависимость вольтваттной чувствительности тонкопленочных детекторов от напряженности электрического поля: \circ — $T=300$ К; \blacktriangle — $T=78$ К. Сплошные линии — расчет: 1 — $T=300$ К; 2 — $T=78$ К; $d=2100$ Å. $t=4$ м.м.

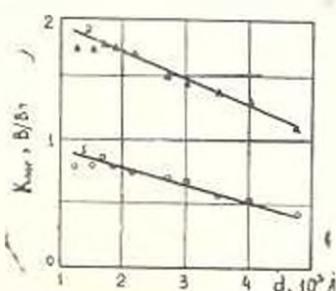


Рис. 2. Толщинная зависимость вольтваттной чувствительности тонкопленочных детекторов в расчете на поглощенную в пленке мощность. $E=1200$ В/м; $t=8$ м.м., \circ — $T=300$ К; \blacktriangle — $T=78$ К. Сплошные линии — расчет: 1 — $\tau=3 \cdot 10^{-10}$ с; $T=300$ К; 2 — $\tau=2 \cdot 10^{-10}$ с, $T=78$ К.

Результаты измерения вольтваттной чувствительности в расчете на поглощенную мощность $K_{\text{пог}}$ для пленок различной толщины (рис. 2), изготовленных в одном технологическом цикле на одной подложке, показали, что $K_{\text{пог}}$ увеличивается с уменьшением толщины пленки, что подтверждает теоретические выводы о существовании размерного эффекта чувствительности ТП детекторов. Расчетная толщинная зависимость вольтваттной чувствительности (рис. 2) удовлетворительно согласуется с экспериментальной при величине скорости поверхностной релаксации энергии носителей, равной $2 \cdot 10^{10}$ м/с при $T=78$ К и $3 \cdot 10^{10}$ м/с при $T=300$ К.

По измеренным значениям вольтваттной чувствительности рассчитывалась предельная чувствительность, величина которой для пленки толщиной 1600 Å, составляла $\sim 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} при $T=300$ К и $\sim 2 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} при $T=78$ К. Найденные значения скорости поверхностной релаксации энергии носителей позволили определить по формуле (11) инерционность τ ТП детекторов: при толщине пленок $1200 - 4850$ Å $\tau \approx (0,5 - 2) \cdot 10^{-10}$ с при $T=300$ К и $\tau \approx (1 - 4) \cdot 10^{-10}$ с при $T=78$ К.

Основным достоинством исследованных детекторов являются конструктивная и технологическая простота, высокая граничная частота, малая инерционность и возможность использования в интегральных схемах миллиметрового диапазона. Возможные пути повышения чувствительности ТП детекторов — использование тонких пленок с высокой

подвижностью носителей и низкой величиной неупругости поверхностного рассеяния, для чего необходимо изготовление бездефектных пленок с чисто зеркальным рассеянием носителей на поверхности.

Ереванский филиал ВЦАХ АМН СССР

Поступило 03. XI. 1980

Ա. ՈՒ ՊՈՂՈՍՅԱՆ

ԹԻՍՄԱՌԵՏԻ ԲԱՐԱԿԻ ԹԱՂԱՆԹԵՐՈՒՄԻ ԼԻՅԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԻ ՏԱՔՍՑՄԱՆ
ՎԻՍԱ ԶԻՄԵՎԱՆԻ ԳԵՏԵԿՆՈՐԵՆԵՐԻ ՊԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓԱՅԻՆ ԷՖԵԿՏԸ

Ա մ փ ո փ ո ռ մ

Ուսումնասիրված է թաղանթի մ. հաստության, լիցքակիրների էներգիայի մակերևույթային ուղակաթիլայի γ տրադոկայան, բյուրեղային ցանցի ցերմատտիհանի և էլեկտրական դաշտի լարվածության ազդեցությունը բարակ թաղանթային զերբարձր հաճախականության դետեկտորների հիմնական բնութագրերի (վոլտաատային \bar{K} և սահմանային զդայության, իներցիոնություն) վրա ճուշդ է տրված, որ մ-ի ու γ -ի փոքրացումը բերում է K -ի մեծացմանը: Փորձնականորեն ուսումնասիրված է բարակ թաղանթային դետեկտորների զգայնությունը (թաղանթների հաստությունը 1200—4800 Å) ալիքի 8 մմ և 4 մմ երկարության դիսպազիտում 300 և 78 K շերմաստիճանների դեպքում: Թաղանթի հաստության զգայական կախվածությունից որոշված են բիամուտի թաղանթներում էլեկտրոնների էներգիայի մակերևույթային ուղակաթիլայի տրադոկայանը և ժամանակը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ветник Н. К., Ногосян А. С., Ситникова М. Ф. Приемное устройство СВЧ диапазона на основе тонких пленок висмута и *n-InSb*. Сб.: «Расчет, конструирование и технология пролонгата устройств СВЧ», М., изд. ЦЭТИ, 1977, с. 81—83.
2. Ветник Н. Б., Ногосян А. С., Ситникова М. Ф. Размерный эффект в разогретых пленках висмута. «Физика низких температур», т. 5, № 2, 1979, с. 132—139.
3. Ветников А. Н., Губинков В. Н., Ластивя В. И., Мисудин В. В. О предельной чувствительности детекторов, основанных на разогретом электронном газе в *n-InSb*. «Известия вузов. Радиофизика», т. 11, № 4, 1968, с. 602—610.
4. Пинскер Т. П., Сандомирская В. Д. Электропроводность полупроводниковых пленок в сильных электрических полях. Сб. «Вопросы пленочной электроники», М., «Советское радио», 1966, с. 277—287.
5. Козлов Ш. М. К теории горячих электронов в полупроводниках. ФТТ, т. 4, № 9, 1962, с. 2471—2481.