F.é.m. PHOTOVOLTAÏQUE D'UNE JONCTION $p - n$ INTENSÉMENT ILLUMINÉE DANS LE SILICIUM

Par B. M. VUL, V. S. VAVILOV, L. M. BLINOV et G. N. GALKIN,

Université d'État de Moscou M. V. Lomonosov
et Institut de Physique de l'Académie des Sciences, P. N. Lebedev, Moscou.

Résumé. — Nous présentons ici les résultats de recherches sur la force électromotrice photovoltaïque dans les éléments de batteries solaires au silicium, illuminés par les impulsions d'un laser à rubis d'une puissance de 5 mégawatts par cm^2 . La f. é. m. atteint la saturation, mais sa valeur maximale limite est moindre que la différence de potentiel de contact calculée.

Abstract. — We present the results of studies on the photovoltaic electromotive force in silicon solar cells, illuminated by light pulses from a ruby laser with a power of 5 megawatts/ cm^2 . A saturation is reached for the e. m. f., but its maximal value is lower than the calculated contact-potential difference.

La plupart des travaux théoriques et presque toutes les recherches expérimentales dans lesquels on a étudié la f. é. m. photovoltaïque sur la jonction $p-n$ des cristaux se sont jusqu'ici limités aux cas d'excitations relativement faibles, c'est-à-dire pour des concentrations de porteurs injectés Δn , Δp plus faibles que celles des porteurs majoritaires n_n , p_p . Dans ces conditions, la f. é. m. est proportionnelle au logarithme de l'intensité de la lumière [1].

Cependant, des considérations simples, confirmées par le calcul [2], amènent à penser qu'avec des excitations très intenses (Δn , $\Delta p \gg n_n$, n_p) la barrière de potentiel de la jonction $p-n$ disparaît pratiquement et la f. é. m. doit tendre vers la différence de potentiel de contact (d. p. c.).

La saturation de la f. é. m. sous l'irradiation d'impulsions d'un laser a été observée expérimentalement dans les photoéléments au silicium. Selon Girton [3], la f. é. m. limite diminuait avec l'accroissement de la température de l'échantillon et avec la résistivité de la région p . Cela donne l'impression que l'on peut mesurer la d. p. c. de la jonction $p-n$ en opérant sous forte excitation.

Nous avons recherché la relation existant entre la f. é. m. photovoltaïque et la puissance du flux lumineux tombant sur la jonction $p-n$ d'un cristal de silicium irradié par un laser à rubis modulé $\lambda = 0,69 \mu$. Un système de filtres, calibrés sous fortes et faibles puissances d'illumination, permettait d'obtenir des intensités de lumière allant de 10^{-1} à $5 \times 10^6 \text{ W.cm}^{-2}$. La vitesse maximale des porteurs produits atteignait ainsi $10^{29} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ et la profondeur de pénétration de la lumière était d'environ 3μ . L'augmentation de l'intensité de la lumière

FIG. 1. — Variation de la f. é. m. photovoltaïque en fonction de l'intensité de la lumière.

N° 1 : jonction obtenue par diffusion

$p_p = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $n_n' = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,
 $t_u = 5 \times 10^{-8} \text{ s}$, éclairée dans la région n .

N° 2 : petite jonction obtenue par bombardement ionique $p_p = 1,7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $n_n = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

a) $t_u = 5 \times 10^{-8} \text{ s}$.

b) $t_u \approx 10^{-3} \text{ s}$ éclairée dans la région n .

d) $t_u = 5 \times 10^{-8} \text{ s}$ la jonction $p-n$ éclairée sous incidence rasante.

jusqu'à $5 \times 10^7 \text{ W.cm}^{-2}$, au moyen d'une focalisation, détruisait la surface de l'échantillon.

Nous avons d'abord étudié de nombreuses jonctions obtenues par diffusion de phosphore dans le silicium de type p . La concentration superficielle des donneurs était identique dans ces échantillons et égale à $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, mais celle des accepteurs p_p y était différente. La jonction $p-n$ était à une distance de 5 à 6 μ de la surface de la couche n éclairée. La différence de potentiel de contact, calculée d'après la position du niveau de Fermi, était de 1,00 volt pour $p_p = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et de 1,18 volt pour $p_p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. La courbe de variation de la f. é. m. photovoltaïque en fonction de l'intensité de la lumière est montrée par la courbe n° 1 de la figure 1, typique pour une de ces diodes diffusées. La différence de potentiel de contact pour cet échantillon est représentée sur la même figure par le court segment de droite horizontale. La courbe 1 de la figure 2 montre la variation de f. é. m. et la courbe 2

FIG. 2. — Variation de la f. é. m. photovoltaïque maximum :

Courbe 1 : calculé d'après la différence de potentiel de contact.

Courbe 2 : à partir de la concentration p_p (jonction de diffusion) $n_n = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

celle de la d. p. c. calculée en fonction de la concentration p_p du cristal. On voit qu'il y a corrélation entre les valeurs des expériences f. é. m. mesurées et des d. p. c. calculées, mais que celles calculées sont notablement plus petites que celles mesurées.

Nous avons également effectué des expériences

complémentaires sur des diodes obtenues par bombardement ionique de phosphore sur des cristaux de silicium de type p en supprimant ensuite les défauts de réseau par chauffage. Dans ces échantillons, la jonction $p-n$ était localisée à environ 1 μ de la surface. La concentration des électrons était $n_n \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et la distribution des donneurs était uniforme. La f. é. m. photovoltaïque d'un de ces échantillons est montrée par la courbe 2(a) de la figure 1.

L'impulsion d'excitation avait une courte durée ($t_n \approx 5 \times 10^{-8} \text{ s}$), ce qui explique l'allure inhabituelle des courbes n° 1 et 2(a) dans la région des faibles intensités de lumière (forte pente et petite valeur de la f. é. m.). Cependant, dans les conditions de saturation, la f. é. m. photovoltaïque ne dépend pas de la durée de l'impulsion utilisée, comme le montre la courbe 2(b) obtenue sous excitation au moyen d'un laser non modulé avec $t_n \approx 10^{-8} \text{ s}$.

Les résultats des mesures nous conduisent aux conclusions suivantes :

1. Par accroissement de l'intensité de la lumière la f. é. m. photovoltaïque tend vers la saturation. La tendance à la saturation commence pour une intensité de l'ordre de 1 W.cm^{-2} dans le cas « stationnaire » (courbe 2b). Il fallait s'y attendre puisque la condition $\Delta n_p \ll p_p$ ne s'applique pas. Si l'on fait une estimation approximative en considérant que la durée de vie des électrons dans la région p est $\tau_n \approx 10^{-6} \text{ s}$, on obtient $\Delta n = g \cdot \tau_n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ avec $g = 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

2. La saturation de la f. é. m. photovoltaïque se manifeste sur plusieurs ordres de grandeur de la puissance d'illumination. La chute de f. é. m. dans la région des intensités encore plus fortes semble être conditionnée par l'apparition d'une f. é. m. Dember de signe contraire, puisque par excitation d'une jonction $p-n$ sous incidence rasante (courbe 2b) la décroissance de la f. é. m. photovoltaïque ne s'observe pas.

3. Dans aucun cas la f. é. m. limite ne coïncidait avec les valeurs calculées de la différence de potentiel de contact, mais elle était toujours moindre. Vraisemblablement une partie de la barrière de potentiel de la jonction $p-n$ subsiste même pour l'irradiation maximale. Il devient maintenant évident que la mesure de saturation de la f. é. m. photovoltaïque ne peut pas servir de méthode de détermination de la différence de potentiel de contact dans les jonctions $p-n$ de silicium.

Les auteurs remercient V. D. Egorov pour de très utiles remarques, ainsi que N. M. Bordina et V. V. Titov pour les échantillons des jonctions $p-n$ de silicium, et E. Grillot et M. Bancie-Grillot pour la traduction en français de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

[1] CUMMEROW (R. L.), *Phys. Rev.*, 1959, **95**, 16.

[2] KEATING (D. N.), *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, 564.

[3] GIRTON (D.), *Proc. IEEE*, 1963, **51**, 938