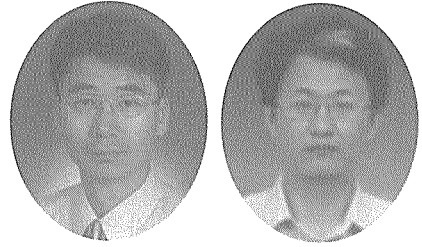


양전자를 이용한 원자 크기의 결함 분석 연구



김재홍, 전권수

원자력의학원 RI 및
방사성의약품개발실

1. 서론

최근에 양전자(Positron)와 물질과의 상호 작용이 이해되면서, 양전자 분광기는 고체의 결함과 전자의 전기적 구조를 연구하는데 독특한 분광기로서 사용되어지기 시작했다. 반도체나 도체에 조사된 양전자들은 전자와의 쌍소멸을 통해 생성되는 감마선에 전자들의 밀도와 운동량 정보를 전달한다. 측정된 전자들의 밀도와 운동량의 분포는 고체 결함의 종류와 농도 그리고 전자들의 전기적 구조를 규명하고, 또한 결함의 전하 상태와 화학적 성분을 구별 할 수 있다. 양전자의 조사 에너지를 변화시킴으로 비파괴적으로 깊이에 따른 원자 크기의 결함 분포를 분석할 수 있다. 간단한 실험 장치와 비교적 용이한 분석 등 많은 장점을 갖지만 양전자의 수가 적어서 장시간 측정해야 되는 단점도 있다.

양전자는 1928년에 디락에 의해 예측이 되었고, 1932년에 앤더슨이 양전자를 처음으로 발견하게 되었다. 그 후 40, 50년대에 양전자가 고체내의 전자와의 쌍소멸을 통해 유용한 정보를 줄 수 있다는 것을 보였고, 다량의 양전자와 저 에너지를 갖는 양전자를 생성

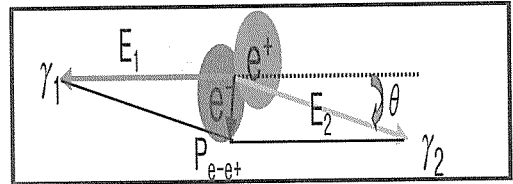
함으로 본격적인 양전자를 이용하여, 도체나 반도체의 표면 근처에 있는 결함의 농도와 종류를 간단한 방법으로 예측 가능하게 해 준다. 이 외에도 여러 가지 다른 응용이 있으나, 여기에서는 주로 결함의 연구에 관해 주로 살펴보기로 한다.

2. 양전자의 생성과 소멸

전자의 반입자인 양전자는 전자와 같은 질량과 전하량을 갖지만, 양의 전하를 갖는다. 양전자는 방사성 동위원소가 베타(β^+) 붕괴를 할 때 1.27 MeV의 감마선과(출생 신호) 동시에 생성되고, 전자와 같이 진공 중에서 안정적인 입자이나, 물질 안에서는 하나의 전자와 만나 수 백 피코초(pico-second, 10^{-12} sec) 이내에 두 개의 0.511 MeV의 감마선을(소멸신호) 방출하면서 소멸한다(쌍소멸과정). 출생신호와 소멸신호의 시간간격은 양전자의 수명으로 정의되고, 양전자의 수명은 물질내의 전자의 밀도에 반비례한다. 즉, 격자 결함의 자리에는 전자의 밀도가 감소함으로 양전자의 수명이 상대적으로 길어진다(양전자 수명 측정법). 길어진 양전자의 수명은 결함의 크기에

비례하고, 수명 성분의 강도는 결함의 농도를 의미한다. 양전자와 전자의 질량에너지가 감마에너지로 전환되는 과정인 쌍소멸과정에서는 에너지와 운동량이 보존된다. 양전자의 소멸과정을 도식적으로 보여주는 <그림 1>에서 두 개의 감마선의 에너지의 총합은 $(E_1 + E_2)$ 전자와 양전자의 질량에너지와 (m_0c^2) 전자의 구속에너지의 (E_b) 합과 같다 $(E_1 + E_2 = 2m_0c^2 + E_b)$. 따라서, 두 감마선 에너지의 분포를 (E_1, E_2) 이차원으로 측정을 하면 코아 전자들의 구속에너지를 알 수 있고, 양전자가 소멸한 원자의 화학적 성분을 알 수 있다. 방출되는 감마선의 진행방향에 평행한 전자의 운동량성분은 소멸 감마선에 에너지 전위 (도플러효과)를 야기시키고, 운동량이 큰 코아 전자는 소멸감마선에 많은 에너지 전이가 즉, 도플러 넓어짐이 커진다 (Doppler Broadening). 넓어짐의 정도는 소멸되는 양전자의 소멸 자리에서의 전자의 운동량과 상관관계를 갖는다. 또한 감마선에 수직방향의 전자 운동량은 감마선에 일직선상으로부터의 편향(θ)을 준다. 전자와 양전자 쌍이 정지 상태에 있다면 (전자의 운동량이 없는 상태), 두 소멸 감마선들은 일직선상으로 180도의 각을 가지고 전파된다. 하지만, 전자가 운동량을 가지므로 0.511 MeV의 소멸선이 일직

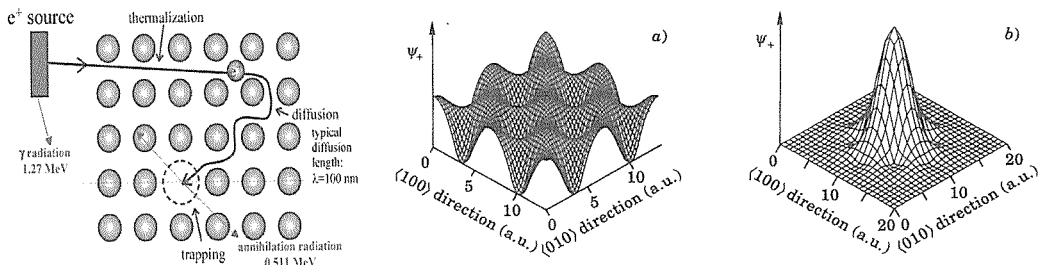
선상으로부터 벗어나고 (편각), 편각의 크기는 운동량의 크기에 비례한다. 이 방법은 고체의 페르미 면을 측정하는데 유용하다. 이 두 방법은 전자의 운동량을 측정하고, 양전자 수명은 전자의 밀도를 예측하게 해 준다.



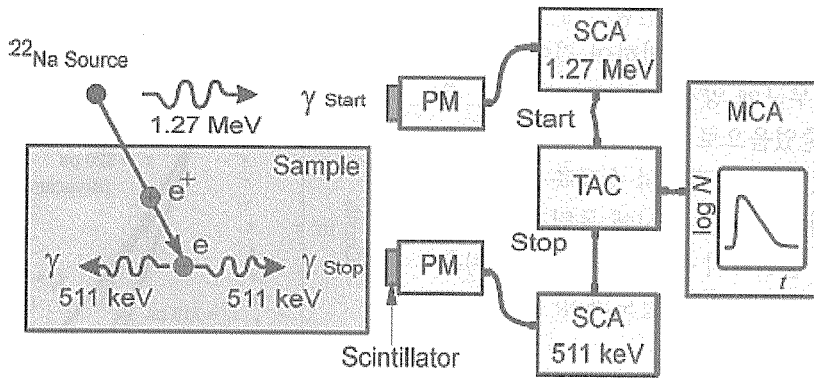
<그림 1> 양전자-전자 쌍의 소멸과정

3. 양전자 기술의 원자 크기 결함 민감도

동위원소로부터 나온 양전자들은 수 피코초 이내에 에너지를 잃고 열적평형상태에 이른다. 열평형에 이른 양전자들이 격자 내에서 확산하는 도중, 원자가 없는 (빈격자 공간) 결함의 자리에 포획이 되어서 국소화된다 <그림 2>. 반도체에서의 이러한 포획자리들은 결정의 불완전 (결함들), 예를 들면 빈 자리결함과 어긋나기 결함들이다. 한 양전자가 소멸하기 전까지 확산하는 거리는 100 nm 정도이고, 결함의 분해도(민감도)는 10^6 분의 1 (1 ppm) 정도이다. 결함이 없는 격자 내에서는 양전자가 자유상태인 블락상태로



<그림 2> 양전자가 결함에 포획이 되는 과정



〈그림 3〉 양전자의 수명 측정 실험 장치

주기적인 분포를 보여 주지만 〈그림 2(a)〉, 원자핵으로부터 척력이 작용하여 그 밀도가 줄고, 원자간 사이는 양전자의 밀도가 최대, 이와는 달리, 격자결함에 포획된 양전자의 파동함수는 결함의 자리에 국소화 됨을 보여 준다 〈그림 2(b)〉. 이러한 결함에 포획된 양전자의 파동 함수는 인접한 주위의 한 전자와 소멸해서 감마선으로 전환되기 전까지 공간적으로 국소화 되고, 감소된 결합 부근의 전자밀도로 인하여 수명이 길어지고, 운동량이 작은 바깥 전자와의 소멸률이 증가함으로 도플러 넓어짐효과가 줄어든다. 이 방법으로 결정 결함의 종류와 농도를 연구하는데 유용하다. 구체적으로 위에서 언급한 방법들을 아래에 순서적으로 기술한다.

4. 양전자 측정기술

가. 양전자 수명 측정

(Positron Annihilation Lifetime, PAL)

〈그림 3〉은 양전자 수명 측정 장치를 보여 준다. 양전자 수명은 Na-22 동위원소에서 양전자가 생성될 때, 동시에 발생하는 1.27 MeV의 감마 양자의 방출시간과 시료 내에서

양전자가 소멸 할 때 생성되는 0.511 keV의 감마 양자들의 시간간격으로 기록되어진다. 1.27 MeV의 감마 광자가 섬광체 감마 검출기에서 전기적 신호로 전환되고, 1.27 MeV에 해당되는 펄스가 시간-진폭 변환기(TAC)로 전달되어 시간 측정이 시작된다. 동일한 과정을 통하여, 511 keV의 감마선이 전기적 신호로 전환되어 TAC으로 전달 될 때까지의 시간이 기록된다. TAC은 두 전기적 신호의 시간간격이 출력의 크기에 비례하게 전환시켜서 여러 펄스 분석기(MCA)에 보내고 컴퓨터에 기록된다. 즉, 검출된 소멸 광자의 수가 시간의 함수로 기록이 되고, 이 데이터를 분석함으로써 양전자의 수명을 구할 수 있다. 시료와 소스가 샌드위치 되어서 중앙 부분에 위치하고, 두 개의 검출기 출력은 간단한 전기회로를 통해서 컴퓨터에 기록이 된다.

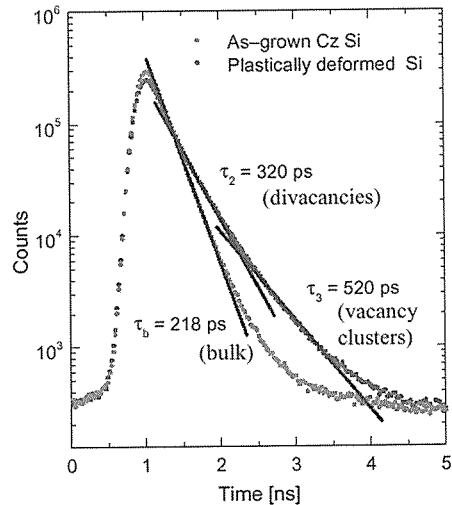
〈그림 4〉에서 보여 주는 양전자의 수명 측정 곡선은 변형 전과 후의 실리콘에서 얻었다. 변형 전의 실리콘에서 얻은 양전자 수명 곡선(적색)으로부터 218ps의 수명을 얻은 반면, 변형된 실리콘에서 (파란색) 얻어진 두 개의 길어진 양전자 수명들은 단원자 결함(320ps)과 다원자 결함(520ps)이 생성됨을

의미한다. 양전자들이 열린공간에 포획이 될 때, 결함이 없는 경우에 비하여 길어지는 이유는, 결함 부근에 양전자가 국소화되고, 전자 밀도가 줄었음으로 양전자의 소멸률이 작아지기 때문이다. 양전자의 수명측정 기술로 결함의 크기와 농도를 동시에 독립적으로 얻을 수 있다. 양전자의 수명(소멸률의 역수)은 소멸자리에서의 전자의 밀도와 양전자의 밀도의 중첩으로 표현된다.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_0^2 c \int |\psi^+(r)|^2 n_-(r) \gamma r dr$$

여기에서 r_0 는 고전적 전자의 반경, c 는 빛의 속도, $\psi^+(r)^2$ 은 양전자 밀도, $n_-(r)$ 은 전자의 밀도, 그리고 r 은 위치벡터이다. 양전자의 소멸률은 (수명은 역의 관계) 양전자의 밀도와 전자의 밀도의 중첩에 비례한다. <그림 5>는 이론적으로 격자상수와 결함이 클수록 양전자의 수명이 길어짐을 시사해준다. 복합 반도체의 경우에는 특정 원소의 결함에 따라서도 양전자의 수명이 달라짐으로 결함의 원소를 확인 할 수 있다. 하지만, GaAs의 경우와 같이 주기율표에서 인접한 원소의 경우에는 양전자 수명에 작은 변화를 보여주나 도플러 넓어짐 측정으로 그 구분이 가능하다.

게르마늄에 조사된 전자빔에 의해 생성되는 프렌켈 형태의 결함이 양전자 수명으로 측정되었다. <그림 6>의 오른쪽에서 보여 주듯이, 조사한 전자의 양이 많을수록 결함이 많이 생성되어 양전자의 수명이 230 ps에서 280 ps까지 길어짐을 보였다. 생성된 결함들은 시료를 200 K 까지 열처리 할 때 양전자의 평균 수명이 급격히 감소함은 결함이 상쇄됨을 알 수 있다.



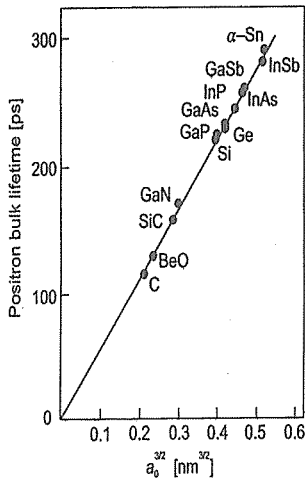
<그림 4> 양전자 수명 측정 곡선

나. 전자의 운동량 측정

(Doppler Broadening, DB)

고체 내의 전자들의 밀도를 양전자 수명이 말해 준다면, 전자의 운동량분포는 도플러 넓어지기, 즉 소멸 감마선의 에너지 편이로 측정 할 수 있다. 기본적으로, 소멸 과정에서 전자-양전자 쌍의 운동량이 소멸 감마선에 보존이 됨을 이용한다. 열적 평형 상태에 이른 양전자의 운동량은 전자의 운동량에 비해 아주 작으므로 감마선의 에너지 편이는 전적으로 전자의 운동량에서 기인한다. 방출된 감마선은 고 에너지 분해능을(1 keV at 511 keV) 갖는 게르마늄 검출기로 그 에너지의 편이가 측정되고 여러 펄스 분석기에 기록된다 <그림 7>. 양전자가 고체의 전자와 쌍소멸하는 과정에서 전자-양전자 쌍의 운동량, P_z (감마의 진행방향 성분) 소멸광자쌍에 전달되어, 소멸 광자의 에너지 편이를 ($511 \text{ keV} \pm \Delta E$) 야기하는 도플러 효과가 나타난다 ($\Delta E = p_z c / 2$).

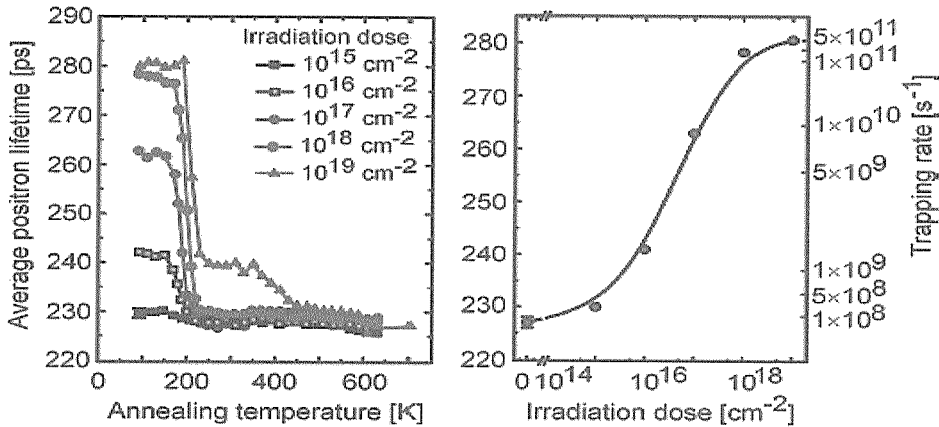
정확한 도플러 스펙트럼을 얻기 위해 많은



Defect	τ_d [ps]	Defect	τ_d [ps]	Defect	τ_d [ps]
C	V	146	Si	V	256
	V ₂	206		V ₂	309
AIP	V _{Al}	265	GaP	V _{Ga}	264
	V _P	261		V _P	275
	V _{Al} V _P	319		V _{Ga} V _P	316
AlAs	V _{Al}	271	GaAs	V _{Ga}	265
	V _{As}	274		V _{As}	268
	V _{Al} V _{As}	439		V _{Ga} V _{As}	321
AlSb	V _{Al}	298	GaSb	V _{Ga}	287
	V _{Sb}	319		V _{Sb}	307
	V _{Al} V _{Sb}	455		V _{Ga} V _{Sb}	350
CdTe	V _{Cd}	321	HgTe	V _{Hg}	304
	V _{Te}	339		V _{Te}	315
	V _{Cd} V _{Te}	384		V _{Hg} V _{Te}	362
GaN	V _{Ga}	273			
	V _N	-			
	V _{Ga} V _N	384			
SiC	V _{Si}	196			
	V _C	153			
	2V	214			

τ_d is the defect-related lifetime.

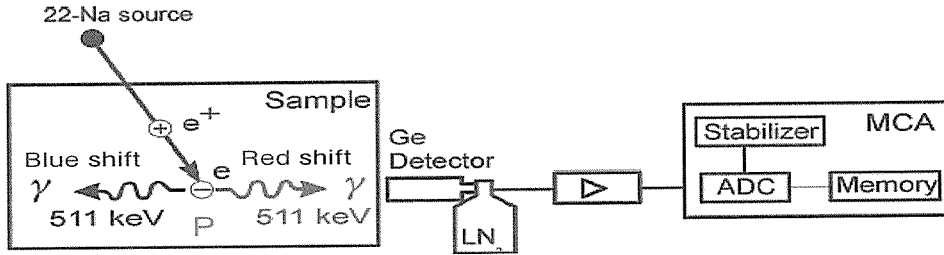
(그림 5) 여러 종류의 물질과 결함들에서의 양전자 수명



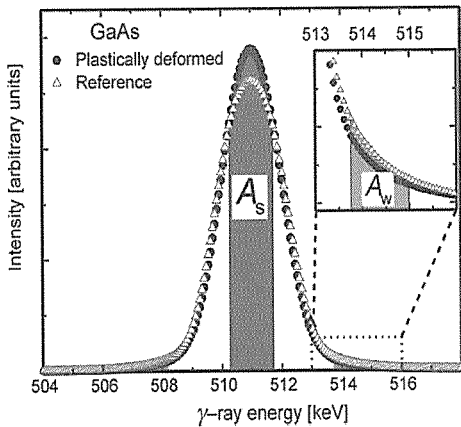
(그림 6) Ge에 전자 조사로 생성된 결함에 따른 양전자의 수명과 열처리 효과

수 백 만개 정도의 소멸 광자를 측정하므로 각각의 소멸 광자의 에너지 곡선은 양방향으로 ($\pm z$) 각각의 도플러효과로 인하여 넓어진다. 열린 공간 결함에 양전자가 포획되므로 운동량이 작은 바깥전자들과의 소멸률이 증가하고 상대적으로 속전자와의 소멸률은 감소한다. 바깥전자들의 운동량이 낮기 때문에

소멸 감마선들의 에너지 편이가 작아지고, 소멸광자의 에너지 분포에 넓어짐이 작아진다. 결함이 없는 경우를 기준으로 했을 때, 결함이 생성된 경우는 소멸 광자의 에너지인 511 keV의 수가 많아지고, 에너지 분포의 폭이 좁아진다.



〈그림 7〉 양전자 운동량 측정 실험 장치



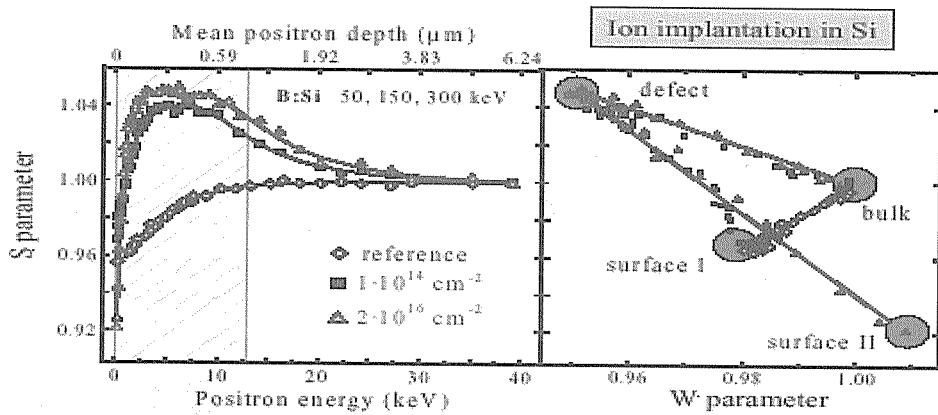
〈그림 8〉 GaAs에서의 DB spectra

〈그림 8〉은 변형된 GaAs에서 양전자가 결함에 포획이 됨으로 도플러효과로 기준곡선보다 좁아짐을 보여준다. GaAs에 변형을 가한 후 취한 도플러 스펙트럼은 변형전의 GaAs에서 취한 것으로 도플러 곡선의 면적(또는 총 검출된 감마선의 수)으로 규격화하면, 변형된 시료(결함이 생성된)에서의 스펙트럼은 511 keV 부근의 감마선의 수가 증가하고 큰 에너지 편이에(높은 운동량) 해당하는 감마선의 수는 감소함을 보인다. 격자 결함자리에 운동량이 작은 바깥전자가 많아짐으로 양전자와 소멸률이 증가하여 511 keV의 감마선의 수가 증가하고, 반대로 큰 운동

량을 갖는 코어 전자의 감소로 큰 에너지 편이가 있는 부분에서는 그 수가 감소하게 된다. 이러한 도플러 효과를 이용하여 결함들의 크기를 정량적으로 분석하는데, 보통 S 변수와 W 변수가 있다. S 변수는 낮은 운동량 변화(바깥 전자의 영향)에 해당하는 스펙트럼의 중심부분의 해당하는 감마선의 수(A_S)를 감마선의 총수(A_0)로 나눈 비이다. W 변수는 높은 운동량 영역에 해당하는 중심으로부터 멀리 위치한 감마선의 수(A_W)를 총 감마선의 수(A_0)로 나눈 비이고, 운동량이 높은 코어 전자들의 공헌이 크기 때문에 화학적 원소를 구분할 수 있게 해 준다.

$$S = \frac{A_S}{A_0}, \quad W = \frac{A_W}{A_0}$$

결함이 생성되는 경우에는, S값들이 증가하고, W값들이 감소한다. 〈그림 9〉는 보론(B)을 규소(Si)에 50, 150, 300 keV로 각각 조사하고, 양전자의 빔 입사 에너지를 변화시키면서 S와 W를 동시에 측정하였다. 양전자의 입사에너지를 변화시킴으로 결함의 분포를 깊이에 따라 알 수 있다. 보론을 조사하지 않은 실리콘에서 취한 S값들은 양전자의 에너지(평균 침투 깊이)가 증가할수록 S값도



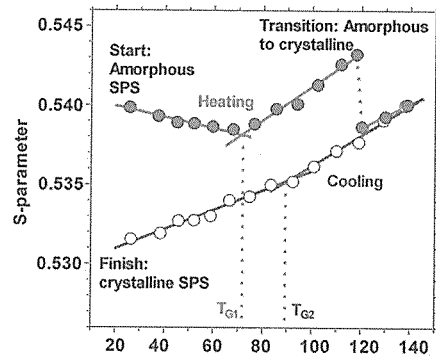
(그림 9) 보론이 조사된 실리콘에서의 깊이에 따른 S 값들 (왼쪽) S-W plot (오른쪽)

단조롭게 증가하다가 일정하게 된다. 이와는 달리, 보론이 조사된 경우에 S값들이 급격히 증가(결함이 많이 생성), 일정하게 유지되다가 감소한다. 표면 근처로부터 $0.6 \mu\text{m}$ 정도 내에 결함이 많이 생성됨을 보여주고 결함이 생성되지 않은 깊은 내부에서는 두 개의 값들이 일치함을 보인다. S를 W의 함수로 표현하면, 일정한 기울기로 (결함의 종류) S가 증가하면 W가 감소한다 (surface II). 보론이 조사되지 않은 surface I의 경우는 S가 증가함으로 W도 선형적으로 증가함을 보인다.

양전자기술이 폴리머에의 열린 공간 결합 측정에 적용된 예가 <그림 10>에 보여준다. 비정질 syndiotactic polystyrene (SPS) 시료를 서서히 가열하였다가 냉각시키면서 (열처리 온도의 함수) S값들을 측정하였다. 처음에 격자들이 완화되면서 S값이 70°C 까지 감소하다가 열영향에 의해 구조가 변함으로 다시 증가한다. 120°C 에서 S값이 급격히 감소하는 이유는 비정질 구조에서 결정 구조로 변하기 때문이다. 냉각하는 과정에서도 기울기가 다른 변곡점을 보이고 S값은 처음 시작

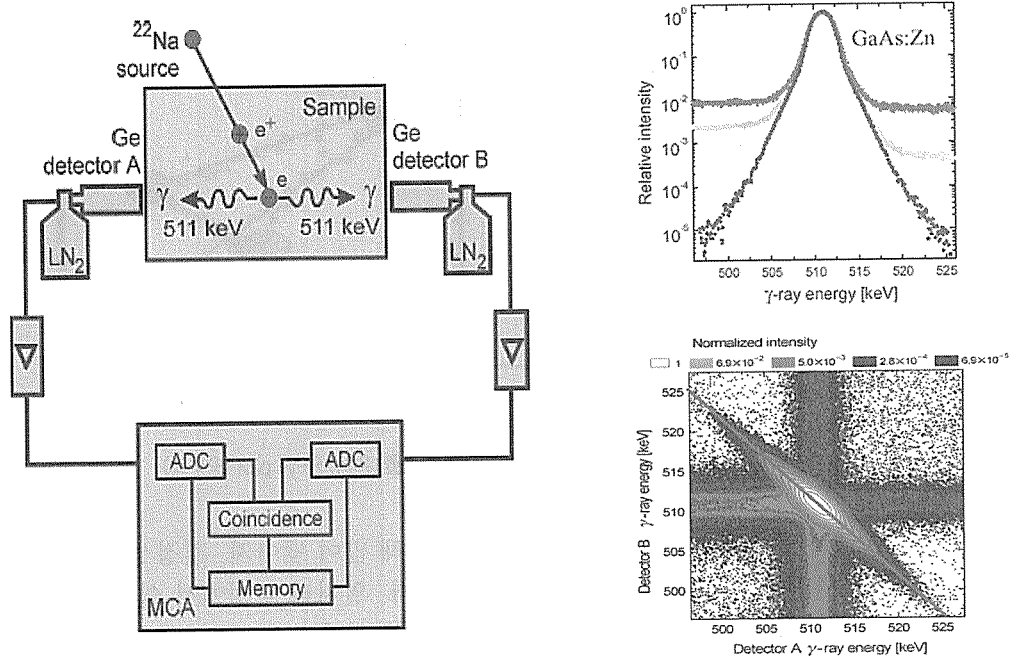
점에 비해 많이 낮아져, 결정성으로 변함을 보여준다. 열처리 과정에서 쉽게 구조의 변화를 볼 수 있다.

다. 동시측정 도플러 브로딩 (2 γ coincidence Doppler-Broadening)



(그림 10) SPS에서 온도에 따른 S값의 변화

두 감마선을 동시에 측정하는, 동시 계수 도플러 넓어짐 측정 방법은 배경을 아주 낮은 범위로 줄여줄 수 있다. 측정장치는 <그림 11>에서 보여 주듯이 두 번째 감마선이 (첫 번째의 감마선과 일직선상으로) 두 번째 Ge 검

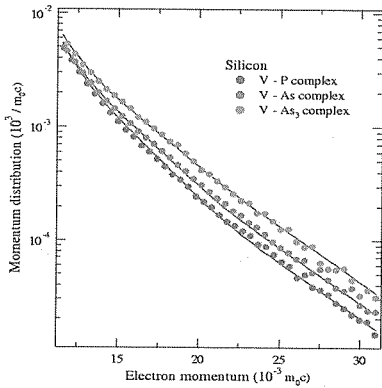


〈그림 11〉 동시측정DB 계략도 (왼쪽), 스펙트럼 (아래), 대각선 방향 (위)

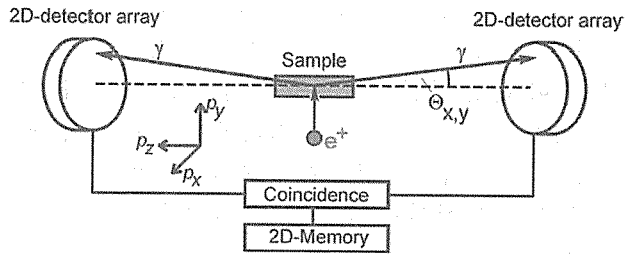
출기에 측정된다. 수평축이 검출기 1번의 신호이고, 수직축은 검출기 2번의 신호이다. 두 개의 Ge 검출기로 얻어진 동시측정 스펙트럼은 이차원 배열을 보여주는데 〈그림 11, 아래〉, 검출기 1번에서 적색편이가 나타나면, 2번 검출기에서는 청색편이가 나타난다. 따라서, 두 감마에너지의 합이 1022 keV가 되는, 위의 왼쪽에서 아래 오른쪽으로 대각선 방향의 분포가 〈그림 11, 위〉와 같이 측정된다. 이 대각선 방향의 분포는 소멸과정에서 운동량 보존의 법칙으로 설명된다. 처음 검출기에서 측정된 도플러 편이에 의해 소멸되는 감마 에너지의 증가는 (청색편이) 두 번째 검출기에서는 에너지의 감소 (적색편이)가 동시에 야기된다. 즉, 총 합이 두 감마선의 에너지는 1022 keV로 일정하게 된다. 오른쪽 위의

분포는 일반적인 도플러 방법으로 측정된 것으로서, 낮은 에너지와 높은 에너지 부분에서 비대칭적이나, 동시계수 측정 방법은 배경을 파격적으로 줄이고 그 모양도 대칭적이다. 신호 대 배경의 비가 10^{-5} 이고 향상된 분해능을 보여준다. 동시계수 측정 법은 근원에서 베타 붕괴의 1.27MeV 감마선에 의해 생성되는 배경을 줄여준다.

향상된 분해능으로 결함의 화학적 원소를 규명 할 수 있다는 예를 〈그림 12〉에서 보여 주고 있다. 실리콘에 인(P)를 첨가한 시료를 기준으로 할 때, 비소(As)을 같은 농도로 첨가한 경우, 양전자의 수명이 230ps로 길어져 단원자 격자 결함들이 생성됨을 보여준다. 높은 운동량분포 (As 3d 코어 전자의 운동량)의 강도가 인이 첨가된 경우보다 증가되



〈그림 12〉 DB 동시측정으로 측정된 높은 운동량 성분의 분포



〈그림 13〉 ACAR 측정 장치

었고, 격자 결합 주위에 적어도 하나의 비소(As)가 있음을 시사해 준다. 전자를 가속하여 비소가 첨가된 시료에 조사를 시키면, 양전자의 수명은 230ps 정도로 변함이 없고, As 3d 코어 전자 운동량에 의해 편이를 보이는 감마선의 수가 많이 증가됨을 보이고, 이론적으로 3개 이상의 비소 원자가 결합의 주위에 존재함으로써 설명되어진다. 양전자의 수명과 운동량을 동시에 측정하면, 여러 유용한 정보를 얻고 문제 해결에 도움을 준다.

라. 수명 운동량 상관 측정법

(Age-Momentum Correlation, AMOC)

양전자의 수명과 운동량을 동시에 측정함으로써 물질의 특성을 더 깊은 이해할 수 있다. 감마선의 운동량 분포를 양전자의 수명의 함수로 분석함으로써 표면과 내부의(양전자의 수명이 다른 부분) 전자 운동량 분포를 동시에 이해할 수 있다. 열처리 과정에서 표면과 내부의 S값들을 측정한 실험이 발표된 바 있다. 이와 반대로, 양전자의 수명을 운동량의 함수로 표현하면 전자의 운동량과 수명의

상관성을 직접 알 수 있다.

마. 각상관소멸광자법

(Angular Correlation Annihilation Radiation, ACAR)

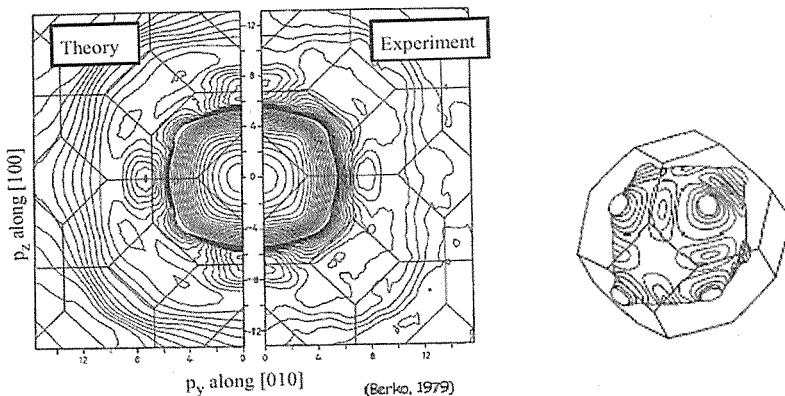
양전자-전자 소멸과정에서, 전자의 운동량이 없다면 두 개의 소멸 감마선은 운동량보존을 만족하기 위하여 같은 운동량을 가지고 서로 반대의 방향(일직선상)으로 진행할 것이다. 이미, 전자의 감마선과 평행한 방향의 운동량은 감마선에 에너지편이(도플러효과)를 야기함을 보았다. 이와 유사하게, 감마선에 수직방향인 두 개의 운동량 성분들($P_{x,y}$)은 0.511 MeV 소멸 감마 광자에 일직선상으로부터 작은 각으로 벗어나게 한다. 광자의 전파 방향과 수직방향의 운동량 성분은(p_x, y)는 소멸 감마선들이 일직선으로부터 작은 각을 가지고 벗어나게 하고, 그 각의 크기는 전자의 운동량의 크기에 비례한다. $\theta_{x,y} = \frac{p_{x,y}}{m_0 c}$, 여기서 m_0 는 전자의 정지질량이다. 이 식은 오직 작은 각의 경우에만 적용된다. 이 편각은 전자의 운동량에 비례하고, 일차원

또는 이차원으로 감마-감마 동시 측정 방법으로 측정된다 <그림 13>. 편각($\theta_{x, y}$)은 발생하는 2 개의 감마광자를 위치검출기로 동시계수측정 함으로 이차원적 영상으로 기록된다. 이 측정 방법은 소멸광자 각 상관 법(ACAR)이다. 두 개의 소멸광자의 각의 크기는 양전자-전자쌍의 운동량 분포를 반영한다 (열적 평형 상태에 이른 양전자의 운동량은 전자의 운동량에 비해 무시 될 정도로 작다). 일반적으로 두광자의 일직선상으로부터의 편각은 1-2 밀리라디안 (mrad) 정도이다. <그림 13>은 소멸광자 각 상관 측정 장치를 보여주는데, 많은 감마선 검출기 또는 위치 검출기를 시료로부터 먼거리에 놓고 감마선의 수를 이차원으로 측정한 각상관 스펙트럼은 양전자-전자 쌍의 운동량 분포를 표면에 투사한 원리이다. 소멸 감마광자가 동시에 방출되기 때문에 $\theta_{x, y}$ 는 위치 검출기에 의해 동시측정 배열에서 측정 될 수 있다. 동시계수 측정으로 각 분해도는 0.2에서 5 mrad 정도로 조절할 수 있고, 에너지 분해도로는 0.05에서 1.3 keV 범위에 해당한다. 그래서 소멸광자 각 상관 측정법은 도플러 방법

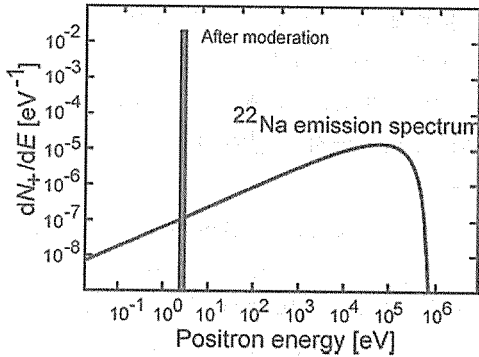
보다 높은 에너지 분해도를 가지고 고체내의 전자의 운동량을 측정하는데 사용된다. 이차원적인 검출기는 Anger Cameras 나 multi-wire proportional chamber와 같은 위치검출기로 측정된다. 대략의 에너지 분해도는 $0.2 \times 0.2 \text{ mrad}^2$ 정도이다. 측정하는데 소요되는 시간은 이차원 스펙트럼의 경우에 수일이 요구된다. 구리에서 얻어진 이차원 스펙트럼 <그림 14>은 이론적 계산과 잘 일치함을 보여준다. 삼차원적 구리의 페르미면은 우리가 고체 물리 교과서에서 본 것과 아주 유사하다. 결함에서의 전자구조도 이와 같은 방법으로 연구되어 질 수 있다.

5. 저에너지 양전자 빔을 이용한 결함연구

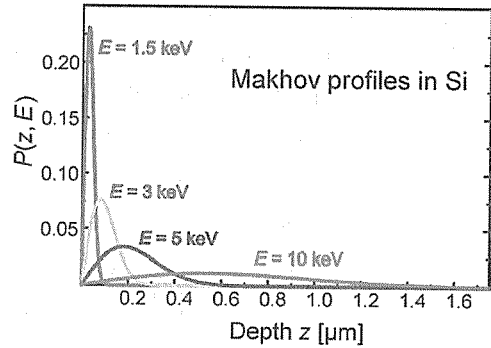
간단하게 소스와 시료가 샌드위치된 배열의 장점은 동위원소로부터 베타 붕괴로 생성된 양전자들이 직접 시료에 침투되어서 진공 상태가 필요치 않으나, 양전자들의 에너지 분포가 매우 넓어서 표면으로부터 100 μm 정도의 체적시료의 결함을 연구하는데 적당하다. 표면이나 계면의 결함을 연구하기 위



<그림 14> 구리에서의 페르미면



〈그림 15〉 양전자의 에너지 분포



〈그림 16〉 Implantation profile at Si

해서는 조사되어지는 양전자의 에너지를 낮게 조절할 필요가 있다. 또, 양전자들의 에너지를 변화시킴으로써 깊이의 함수로 결합을 분석할 수 있다는 장점이 있다. 나트륨 동위원소로부터 생성되는 양전자의 에너지 분포는 〈그림 15〉에서 보듯이 540 keV까지 광범위하게 분포된다. 높은 에너지 때문에 침투 깊이가 깊어서 체적의 연구는 용이하나 얇은 막이나 표면근처의 연구는 불가능하다. 1980년대 초기에 텅스텐이나 어떤 금속들은 양전자가 음의 일함수를 갖음을 발견하게 되고, 즉 양전자가 텅스텐에 조사되면, 에너지를 여러 충돌과정으로 잃고 자발적으로 일함수만큼의 운동 에너지를 가지고 방출된다. 광범위하게 분포되었던 양전자의 에너지가 낮은 에너지로 조절되는 조절기의 원리가 되었다. 조절기에서 나온 양전자들의 에너지 분포는 3 eV 정도이다 〈그림 15〉. 투과형 조절기에서 빠른 양전자들이 소스로부터 나와서 텅스텐 포일에 조사되면, 대부분의 빠른(고속) 양전자들은 투과하고, 저속 양전자들은 에너지를 잃고 열적 평형 상태에 이른 후 포일 내부에서 쌍소멸 된다. 아주 작은 수의 양전자들은 쌍소멸 되기 전에 표면에 확산하고

자유 양전자로 진공 중으로 약 3 eV 정도의 에너지를 가지고 나온다. 그 조절 효율은 10^{-4} 정도이고, 현재까지 발표된 바로는 10^{-2} 까지 이론적으로 가능하다.

조절된 양전자들만을 모아서 시료에까지 전송은 자기적 방법으로 집속하거나 정전기 렌즈를 이용하는 방법이 있다. 조절기로부터 조절된 낮은 에너지 양전자만을 선택한 후 가속시켜서 시료에 전송한다. 조절되지 않은 양전자들은 기계적으로 차단된다. 효과적으로 양전자를 전송하기 위해서는 고진공이 필요하다. 시료의 밀도에 따라 다소 다르지만, 50 keV까지 가속시킴으로써 5 μm 의 침투 깊이까지 조사할 수 있다. 양전자의 수는 초당 1만개 정도를 시료에 조사되고 100만 정도의 수를 얻기 위해서는 100초 정도의 측정 시간을 요한다. 소스 챔버와 시료 챔버가 분리되어 있기 때문에 소스에서 발생하는 배경을 보정할 필요가 없다. 감마선은 투과력이 강해서 스테인리스 스틸의 벽을 뚫고 검출기까지 도달할 수 있기 때문에 감마선의 검출기는 샘플 챔버 밖에 두고 측정한다.

양전자의 입사 에너지를 변화시키면서 결합의 깊이 분포를 얻기 위해서는 양전자의 입

사분포의 이해가 요구된다. 몬테칼로 모의 실험으로 얻은 양전자의 분포를 <그림 16>에서 보여준다. 실리콘에서의 양전자분포는 마코브 분포에 적용이 되고, 낮은 입사에너지의 경우, 양전자의 분포는 표면 가까이 분포됨을 보여준다. 높은 에너지로 갈수록 그 침투 깊이는 깊어지고 분포 또한 넓어진다. 양전자의 입사 에너지를 변화시킴으로 결합의 분포를 평균 침투 깊이의 함수로 이해할 수 있다. 양전자들이 에너지 E를 갖고 조사될 때 입사 또는 침투분포 P(z, E)는 다음과 같다.

$$P(z, E) = \frac{mz^{m-1}}{z_0^m} \exp\left[-\left(\frac{z}{z_0}\right)^m\right]$$

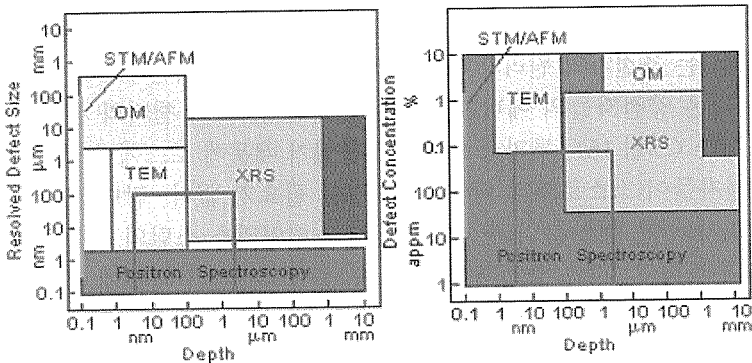
$$\text{With } z_0 = \frac{AE^r}{\rho\Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right)}$$

m, r 그리고 A들은 실험 변수들이다. ρ는 시료의 질량밀도이고 Γ는 감마 함수이다. 대개의 경우 A=4.0 μg cm⁻² keV^{-r}, m=2 그리고 r=1.6 값들이 이용된다. z₀=AE^r/ρ는 평균 침투 깊이이다.

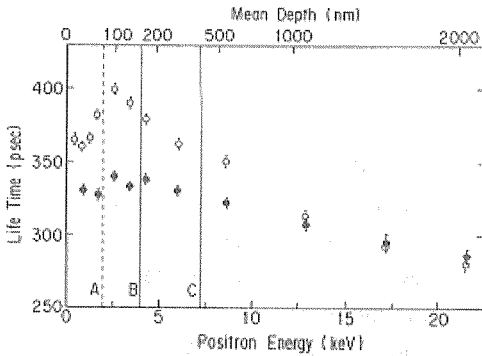
<그림 17>은 결합을 분석하는 다른 기술과의 비교에서, 양전자의 기술은 보다 광범위

한 영역에 적용될 수 있음을 보여준다. 양전자 기술은 원자 크기의 높은 결합 분해도와 넓은 영역의 농도 분해능을 가지고 표면에서부터 10 mm까지의 깊이에 적용될 수 있음을 보여준다.

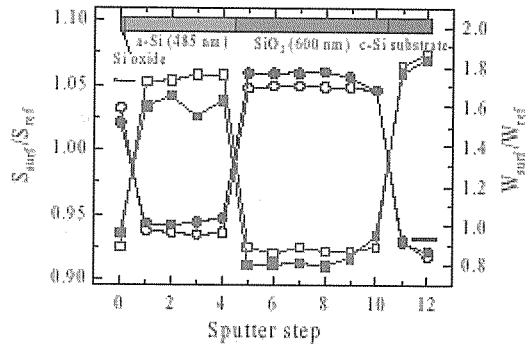
<그림 18>에서는 양전자의 독특한 응용이 Solid-phase epitaxial growth (SPG)로 성장한 실리콘 박막에서 결합을 측정하는 응용을 보여준다. SPG는 비정형의 박막을 단결정 박막으로 변환시키는 과정인데, 비정질 형태의 박막에 이온 빔을 400℃ 정도의 온도에서 주입함으로 단결정으로 변환시킨다. 이 방법은 공정이 간단하여 비용의 절감을 줄 것이다. 시료의 준비는 엔 타입 규소에 130 keV의 에너지로 게르마늄 이온을 주입시켜 비정형 실리콘을 형성하고, 그 특성을 측정하기 위해 보론 이온을 주입한다. 아르곤 이온을 400℃의 온도에서 주입하면 단결정의 실리콘으로 변한다는 러더퍼드 후산란 분광기의 결과와는 달리, 양전자 수명측정 결과는 다원자 격자 결합을 보여준다. 130 keV의 게르마늄이온의 침투 깊이는 표면으로부터 55 nm 정도이고, 400 keV 아르곤 이온의 평균 침투 깊이는 300 nm 정도이다. 양전자의



<그림 17> 양전자 소멸 분광기의 응용범위



〈그림 18〉 깊이에 따른 양전자의 수명




〈그림 19〉 sputtering의 함수로 측정된 S값

조사 깊이가 15 nm, 79 nm 두 경우에 SPG 박막에서 (아르곤 이온을 주입한 경우) 수명이 길어짐을 보였다. 즉, 아르곤 이온이 결합을 생성하여 양전자들의 수명이 길어짐을 뜻한다. 이 두 경우의 막에 양전자의 에너지를 변화시키면서 양전자의 수명을 측정하여 보았다(그림 18). 비정형의 막보다 아르곤이 입사된 막에서의 양전자의 수명이 길어졌으며, 즉 결합이 더 많이 생성되었음을 의미하고, 또한 그 피크 위치가 표면 쪽으로 이동됨을 볼 수 있었다. 양전자 수명으로 보아 결합의 종류는 3개의 원자나 5개의 원자가 없는 결합으로 이해된다.

양전자의 깊이 분해도를 향상시키기 위하여 양전자를 낮은 입사 에너지로 조사하고, c-Si위에 600 nm의 SiO₂를, 그 위에 485 nm의 a-Si를 성장시킨 후 스퍼터링을 하면서 S값을 측정하였다(그림 19). 각각의 층에 뚜렷한 S값에 변화를 주고, 특히 계면에서의 변화는 높은 분해도를 보여주나 스퍼터링

의 방법은 파괴적이다. 양전자의 입사 에너지를 변화하면서 취한 결과와 유사한 경향을 보이나 계면에서는 다소 완만한 변화를 보임으로 깊이 분해도가 양전자의 퍼짐으로 인하여 저하되었다고 설명되어진다.

6. 요약 및 감사

전자의 반물질인 양전자는 물질의 전자와 쌍소멸하는 과정에서 두 개의 감마선을 방출할 때 운동량과 에너지를 보존됨을 이용하여, 물질 내 또는 표면 근처의 결합과 여러 가지 물성을 연구할 수 있다. 비교적 취급이 간단하고 비파괴적 연구 방법이라는 장점이 있는 반면에 방사성 물질을 취급해야 되는 단점도 있다. 유럽을 비롯하여 미국, 일본에서 양전자를 이용한 기술들에 대한 관심이 높아지고 있다. 연구 자료의 인용을 허락해 준 Drs. Weiss, Suzuki, Howell, Simpson 그리고 Krause-Rehberg에게 감사한다. 

[참고문헌]

- [1] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. 117, (1928) 610.
- [2] C. D. Anderson, Science 76, 238 (1932).
- [3] P. Hautojarvi and C. Corbel, Enrico Fermi CXXV, 499 (1993).
- [4] R. Krause-Rehberg and H. S. Leipner: Positron Annihilation in Semiconductors (Springer, 1998). (see more detail at <http://www.ep3.uni-halle.de/positrons/>)
- [5] Prof. P. Simpson, Positron Beam Laboratory University of Western Ontario.
- [6] Dr. Howell, R, Lawrence Livermore National Laboratory.
- [7] Tanigawa S, Uedono A, L. Wei and R. Suzuki, Enrico Fermi CXXV, 748 (1993).

