

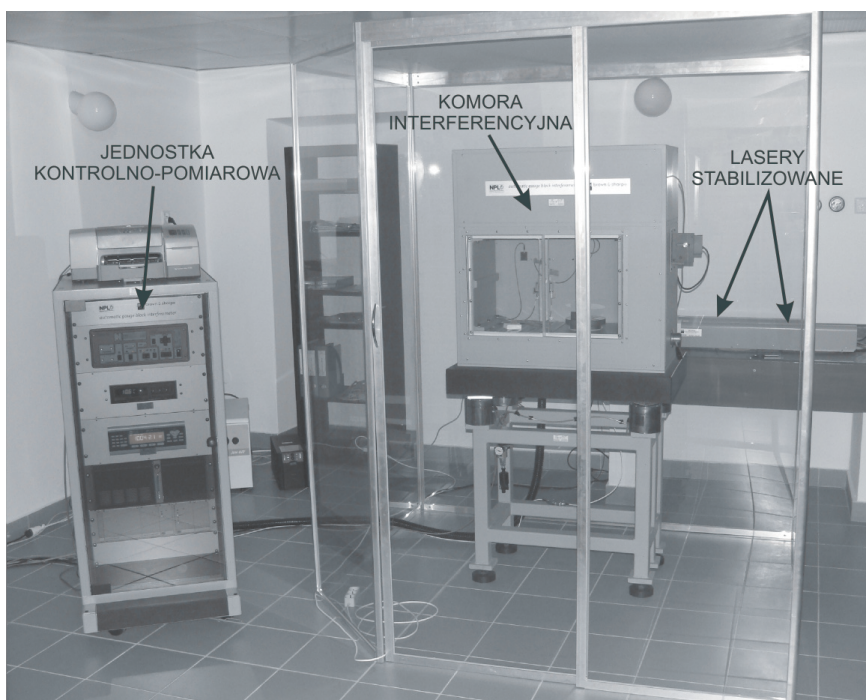
ŹRÓDŁA NIEPEWNOŚCI PRZY WZORCOWANIU PŁYTEK WZORCOWYCH METODĄ INTERFERENCYJNĄ RESZT UŁAMKOWYCH

Robert Szumski
Główny Urząd Miar

1. Wprowadzenie

Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar posiada najdokładniejszy w kraju automatyczny interferometr laserowy do wzorcowania płytek wzorcowych o długościach nominalnych do 300 mm (rys. 1). Umożliwia on pomiar płytek wzorcowych najwyższych klas dokładności [1] o przekroju prostokątnym, kwadratowym i kołowym wykonanych z różnych materiałów takich jak stal, węglik wolframu, ceramika.

Interferometr GBI300 jest połączeniem klasycznego interferometru Twyman'a-Green'a z wysokiej jakości laserami stabilizowanymi częstotliwościowo i sterowaną komputerowo aparaturą pomiarową. Zastosowanie technik komputerowego prze-



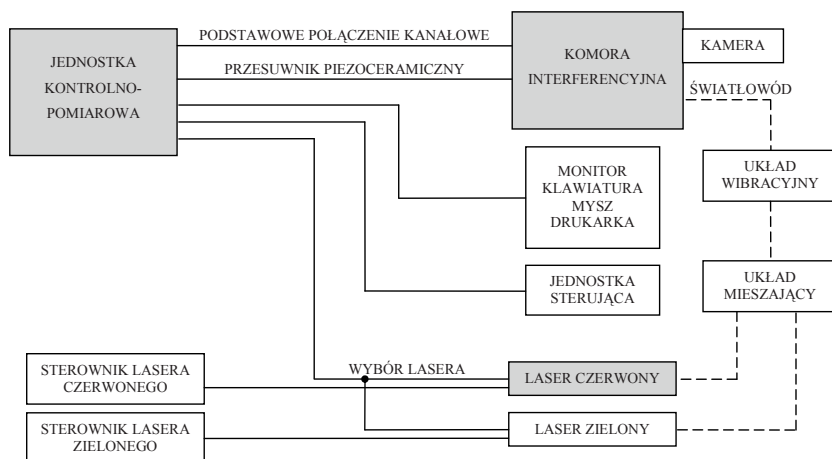
Rys.1. Automatyczny interferometr laserowy GBI300

tworzenia obrazu do analizy interferogramów sprawia, że pomiar jest mniej zależny od umiejętności operatora i przynosi korzyści w postaci szczegółowych pomiarów płaskości i zmienności długości powierzchni pomiarowych płytek wzorcowych [2].

Do podstawowych elementów układu pomiarowego należą:

- komora interferencyjna, w której płytki wzorcowe są stabilizowane termicznie, a następnie mierzone,
- jednostka kontrolno-pomiarowa zawierająca przyrządy pomiarowe, komputer z oprogramowaniem pomiarowym i inne układy sterujące,
- dwa stabilizowane lasery He-Ne, pełniące funkcję wzorców odniesienia, będące źródłem światła o długościach fal 633 nm (barwa czerwona) i 543 nm (barwa zielona). Do ostatecznego wyznaczenia długości płytki wzorcowej używany jest laser czerwony, posiadający lepszą stabilność częstotliwościową.

Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 2 (przyciemnione fragmenty stanowiska zawierają elementy stanowiące źródła niepewności). Podczas pomiaru płytki wzorcowe przywarte są do stolika pomiarowego, którego powierzchnia stanowi płaszczyznę odniesienia przy określaniu odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki mierzonej. Płytki wzorcowe mierzone są z dwóch stron, a wynik jest średnią z rezultatów tych pomiarów, skorygowaną o wartość poprawki na korekcję fazy, uzyskaną metodą stosu.



Rys. 2. Schemat interferometru laserowego GBI300

Stanowisko pomiarowe znajduje się w klimatyzowanym pomieszczeniu laboratoryjnym o temperaturze utrzymywanej w zakresie $(20 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$.

2. Równanie i niepewność pomiaru

Wielkością uzyskiwaną w wyniku wzorcowania jest odchylenie długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowej [1], które wyznaczane jest z poniższego wzoru:

$$d = L_F - L + l_t + l_E + l_\varphi + l_\Omega + \delta l_A + \delta l_G + \delta l_w \quad (1)$$

gdzie:

d – odchylenie długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowej mierzonej,

L_F – długość wyznaczona na podstawie reszt ułamkowych,

L – długość nominalna płytki wzorcowej,

l_t – poprawka temperaturowa,

l_E – poprawka na współczynnik załamania powietrza (równanie Edlen'a),

l_φ – poprawka na zmianę fazy (metoda stosu),

l_Ω – poprawka na adiustację optyki interferometru,

δl_A – poprawka zerowa związana z błędem czoła fali,

δl_G – poprawka zerowa związana z odchyleniem od płaskości i zmiennością długości,

δl_w – poprawka zerowa związana z warstwą przywarcia.

Złożoną niepewność standardową $u_c(d)$ wyznaczenia odchylenia długości środkowej od długości nominalnej mierzonej płytki wzorcowej można przedstawić następująco [3, 4]:

$$u_c^2(d) = \left(\frac{\partial d}{\partial L_F}\right)^2 \cdot u^2(L_F) + \left(\frac{\partial d}{\partial L}\right)^2 \cdot u^2(L) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_t}\right)^2 \cdot u^2(l_t) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_E}\right)^2 \cdot u^2(l_E) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_\varphi}\right)^2 \cdot u^2(l_\varphi) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_\Omega}\right)^2 \cdot u^2(l_\Omega) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta l_A}\right)^2 \cdot u^2(\delta l_A) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta l_G}\right)^2 \cdot u^2(\delta l_G) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta l_w}\right)^2 \cdot u^2(\delta l_w) \quad (2)$$

gdzie z definicji przyjmuje się $u(L) = 0$, a współczynniki wrażliwości są równe 1.

3. Źródła niepewności

Źródła niepewności pomiaru płytek wzorcowych za pomocą interferometru GBI300 można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą składowe niepewności, które mogą zmieniać się w krótkim okresie czasu, np. pomiędzy kolejnymi pomiarami płytki wzorcowej (oznaczone symbolem *). Do drugiej grupy należą składowe, które pozostają niezmiennie w dłuższym okresie czasu, np. aż do ponownego wzorcowania przyrządu [5].

Poniżej przedstawione zostały zidentyfikowane źródła niepewności, mające istotny wpływ na wynik pomiaru [6, 7].

3.1. Odczyt wartości reszty ułamkowej i długość emitowanej fali świetlnej

Długość płytki wzorcowej mierzona jest za pomocą długości fali świetlnej lasera czerwonego. Długość fali świetlnej lasera zielonego jest używana tylko do określenia poprawnego rzędu interferencji.

Długość płytki określona na podstawie pomiaru wartości reszty ułamkowej wynosi:

$$L_F = (\kappa + F) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

gdzie:

κ – ilość połówek długości emitowanej fali świetlnej mieszczących się w danej długości nominalnej płytki wzorcowej (rzęd interferencji),

F – zmierzona wartość reszty ułamkowej*,

λ – długość emitowanej fali świetlnej.

Z powyższego wzoru po uwzględnieniu współczynników wrażliwości oraz wyrazów wyższego rzędu wynika, że wartość niepewności złożonej $u(L_F)$ związanej z określeniem długości płytki wzorcowej na podstawie wartości reszty ułamkowej F i długości λ emitowanej fali świetlnej wynosi:

$$\begin{aligned} u^2(L_F) = & \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(\kappa) + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\kappa + F}{2}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) \\ & + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot u^2(\kappa) \cdot u^2(\lambda) + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) \cdot u^2(\lambda) \end{aligned} \quad (4)$$

W związku z tym, że κ reprezentuje wartość całkowitą rzędu interferencji oraz przyjmując, że algorytm obliczeniowy wybiera poprawną jego wartość dla mierzonej długości, wówczas $u(\kappa) = 0$. Stąd iloczyn:

$$u^2(\kappa) \cdot u^2(\lambda) = 0 \quad (5)$$

Pozostałe składowe wyższego rzędu są pomijalnie małe, więc:

$$u^2(L_F) = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\kappa + F}{2}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) \quad (6)$$

Drugi człon w powyższym wzorze można zapisać następująco:

$$\frac{\kappa + F}{2} = \frac{L}{\lambda} \quad (7)$$

wówczas otrzymujemy:

$$u^2(L_F) = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) \quad (8)$$

Reszty ułamkowe są określane bezpośrednio z mapy fazowej uzyskiwanej z obrazów interferencyjnych zgromadzonych w pamięci komputera. Niepewność pomiaru zależy od jakości płytki wzorcowej i stolika pomiarowego oraz jakości obrazu z kamery i dokładności jego przetworzenia.

Niepewność określenia długości λ emitowanej fali świetlnej lasera czerwonego związana jest z niepewnością jego wzorcowania, uwzględniającą stabilność krótko-terminową lasera* oraz dryftem międzykalibracyjnym. Lasery wzorcowane są za pomocą Syntezera Częstotliwości Optycznych (Państwowego Wzorca Jednostki Długości GUM).

3.2. Efekty temperaturowe

Temperatura płytki wzorcowej mierzona jest w tym samym czasie co jej długość i używana jest do wyznaczenia długości płytki w temperaturze 20 °C w oparciu o jej współczynnik rozszerzalności liniowej. Temperatura płytki wzorcowej mierzona jest za pomocą platynowego czujnika temperatury umieszczonego w części środkowej stolika pomiarowego. Dla płytek dłuższych niż 100 mm pomiar temperatury płytki wykonywany jest po środku jej długości.

Z powodu cyklicznych zmian temperatury w pomieszczeniu i bezwładności cieplnej płytek wzorcowych i stolika pomiarowego, średnia temperatura płytki wzorcowej będzie różniła się od temperatury mierzonej przez czujnik. Ta różnica zależy od indywidualnych warunków temperaturowych pomieszczenia. We wnętrzu komory interferencyjnej GBI300 temperatura utrzymywana jest w przedziale $\pm 0,1$ °C, bez gwałtownych jej zmian.

Rezystancja czujników temperatury mierzona jest za pomocą mostka oporowego, którego wewnętrzny wzorzec rezystancji porównywany jest z raz w miesiącu z zewnętrznym opornikiem wzorcowym o rezystancji 100 Ω .

Poprawka temperaturowa l_t dla płytki wzorcowej przedstawiona jest wzorem:

$$l_t = \theta \cdot \alpha \cdot L \quad (9)$$

gdzie:

θ – różnica pomiędzy temperaturą płytki wzorcowej, a temperaturą odniesienia 20 °C wynosząca $\theta = (20 - t_p)$ °C; temperaturami dopuszczalnymi podczas pomiaru są temperatury z zakresu (19,9 ÷ 20,1) °C, dla którego szacowana niepewność pomiaru pozostaje na niezmiennym poziomie,

α – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału płytki wzorcowej, który dla stali wynosi zwykle $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, dla ceramiki $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, a dla węgla spiekane $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Niepewność standardowa $u(l_t)$ związana z efektami temperaturowymi przy uwzględnieniu współczynników wrażliwości oraz wyrazów drugiego rzędu wynosi:

$$u^2(l_t) = (\alpha\theta)^2 \cdot u^2(L) + (\alpha L)^2 \cdot u^2(\theta) + (L\theta)^2 \cdot u^2(\alpha) + \theta^2 \cdot u^2(L) \cdot u^2(\alpha) + \alpha^2 \cdot u^2(L) \cdot u^2(\theta) + L^2 \cdot u^2(\alpha) \cdot u^2(\theta) \quad (10)$$

przy czym uwzględniając $u(L) = 0$, otrzymujemy:

$$u^2(l_t) = (\alpha L)^2 \cdot u^2(\theta) + (L\theta)^2 \cdot u^2(\alpha) + L^2 \cdot u^2(\alpha) \cdot u^2(\theta) \quad (11)$$

a) temperatura płytki wzorcowej

Ze względu na to, że: $\theta = (20 - t_p)$ (12)

można zapisać: $u(\theta) = u(t_p)$ (13)

Niepewność standardowa określenia temperatury płytki $u(t_p)$ złożona jest z niepewności pomiaru temperatury mostkiem oporowym $u(t)$ i niepewności związanej z możliwym gradientem temperatury dla płytki wzorcowej $u(\theta_{\text{grad}})$:

$$u^2(\theta) = u^2(t_p) = u^2(t) + u^2(\theta_{\text{grad}}) \quad (14)$$

Niepewność złożona pomiaru temperatury $u(t)$ składa się z niepewności związanej z:

- mostkiem oporowym,
- wzorcowaniem czujnika temperatury,
- równaniem interpolacyjnym dla czujnika temperatury (związanym ze skalą temperaturową ITS90),
- dryftem wskazań temperatury pomiędzy wzorcowaniami $u(t_d)$.

Ze względu na zmiany temperatury w pomieszczeniu i bezwładność cieplną płytki wzorcowej i stolika pomiarowego, temperatura płytki będzie inna od temperatury mierzonej przez czujnik umieszczony w stoliku pomiarowym. Powyższy gradient temperatury uwzględnia składowa niepewności $u(\theta_{\text{grad}})$.

b) współczynnik rozszerzalności liniowej*

Podczas wyznaczania długości płytki dla temperatury 20 °C używana jest nominalna wartość współczynnika temperaturowej rozszerzalności liniowej. Wartość współczynnika może się jednak różnić dla poszczególnych płytek. Niepewność określenia tego współczynnika jest kolejnym źródłem niepewności pomiaru. Istotne jest tu maksymalne dopuszczalne odchylenie temperatury płytki od 20 °C (dla opisywanego stanowiska wynosi ono $\pm 0,1$ °C).

c) składowa drugiego rzędu

Spośród niezerowych wyrazów drugiego rzędu, znaczącą wartość posiada tylko poniższe wyrażenie:

$$L \cdot u(\alpha) \cdot u(\theta) \quad (15)$$

3.3. Współczynnik załamania powietrza

Pomiary płytek wzorcowych wykonywane są w powietrzu o zmiennych parametrach i w związku z tym długość fali musi być przeliczana w oparciu o współczynnik załamania powietrza. Poprawka l_E wynika z faktu, że długości fali świetlnej w próżni jest przeliczana na długość fali w powietrzu na podstawie wzoru empirycznego (równania Edlen'a) [8, 9, 10]. Poprawka opisana jest zależnością:

$$l_E = (n - n_0) \cdot L \quad (16)$$

gdzie:

n – wartość współczynnika załamania w powietrzu,

n_0 – wartość współczynnika załamania w próżni ($n_0 = 1$).

Współczynnik załamania powietrza obliczany jest według wzoru Edlen'a, w którym uwzględniono fakt wykorzystywania do pomiaru wilgotności miernika punktu rosy:

$$\begin{aligned}
 (n-1)_{t,p,x,\lambda} = & \left(8091,37 + \frac{2333983 \cdot \lambda^2}{130 \cdot \lambda^2 - 1} + \frac{15518 \cdot \lambda^2}{38,9 \cdot \lambda^2 - 1} \right) \cdot \frac{1 + 0,5327 \cdot (x - 0,0004)}{10^8} \cdot \\
 & \left(\frac{p}{93214,6} \cdot \frac{1 + 10^{-8} \cdot (0,5953 - 0,009876 \cdot t) \cdot p}{1 + 0,003661 \cdot t} \right) \\
 & - \exp \left(\ln(611,2) + \frac{17,62 \cdot t_{dp}}{243,62 + t_{dp}} \right) \cdot \left(3,802 - \frac{0,0384}{\lambda^2} \right) \cdot 10^{-10}
 \end{aligned} \quad (17)$$

gdzie:

- t – temperatura powietrza wyrażona w °C,
- p – ciśnienie atmosferyczne wyrażone w Pa,
- t_{dp} – temperatura punktu rosy wyrażona w °C,
- x – zawartość CO₂ (wartość względna),
- λ – długość fali świetlnej w próżni w μm .

Niepewność $u(l_E)$ związana z poprawką l_E na współczynnik załamania powietrza wyrażona jest w postaci równania:

$$\begin{aligned}
 u^2(l_E) = & \left(\frac{\partial l_E}{\partial t} \right)^2 \cdot u^2(t) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial p} \right)^2 \cdot u^2(p) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial t_{dp}} \right)^2 \cdot u^2(t_{dp}) + \\
 & + \left(\frac{\partial l_E}{\partial x} \right)^2 \cdot u^2(x) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial \lambda} \right)^2 \cdot u^2(\lambda) + L \cdot u^2(E)
 \end{aligned} \quad (18)$$

gdzie:

- $u(t)$ – niepewność określenia temperatury powietrza,
- $u(p)$ – niepewność określenia ciśnienia,
- $u(t_{dp})$ – niepewność określenia wilgotności powietrza,
- $u(x)$ – niepewność określenia zawartości CO₂ w powietrzu,
- $u(\lambda)$ – niepewność określenia długości fali świetlnej,
- $u(E)$ – niepewność związana ze wzorem Edlen'a.

Dla warunków odniesienia: $t = 20$ °C, $p = 100\,000$ Pa, $t_{dp} = 10$ °C, $x = 0,04$ % oraz $\lambda = 0,632991$ μm otrzymuje się następujące wartości współczynników wrażliwości:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial l_E}{\partial t} = & \left(8091,37 + \frac{2333983 \cdot \lambda^2}{130 \cdot \lambda^2 - 1} + \frac{15518 \cdot \lambda^2}{38,9 \cdot \lambda^2 - 1} \right) \cdot \frac{1 + 0,5327 \cdot (x - 0,0004)}{10^8} \cdot \frac{p}{93214,6} \cdot \\
 & \left(\frac{-0,009876 \cdot p \cdot 10^{-8} - 0,003661 \cdot (1 + 0,5953 \cdot p \cdot 10^{-8})}{(1 + 0,003661 \cdot t)^2} \right) \cdot L = -9,18 \cdot 10^{-7} \cdot L \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right)
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial l_E}{\partial p} = & \left(8091,37 + \frac{2333983 \cdot \lambda^2}{130 \cdot \lambda^2 - 1} + \frac{15518 \cdot \lambda^2}{38,9 \cdot \lambda^2 - 1} \right) \cdot \frac{1 + 0,5327 \cdot (x - 0,0004)}{10^8} \cdot \\
 & \left(\frac{1}{93214,6} \cdot \frac{1 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot (0,5953 - 0,009876 \cdot t) \cdot p}{1 + 0,003661 \cdot t} \right) \cdot L = 2,68 \cdot 10^{-9} \cdot L \left(\frac{1}{\text{Pa}} \right)
 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial l_E}{\partial t_{dp}} &= \frac{17,62 \cdot 243,62}{(243,62 + t_{dp})^2} \cdot \exp\left(\ln(611,2) + \frac{17,62 \cdot t_{dp}}{243,62 + t_{dp}}\right) \cdot \left(3,802 - \frac{0,0384}{\lambda^2}\right) \cdot 10^{-10} \cdot L = \\ &= 3,03 \cdot 10^{-8} \cdot L \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)\end{aligned}\quad (21)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial l_E}{\partial x} &= \left(8091,37 + \frac{2333983 \cdot \lambda^2}{130 \cdot \lambda^2 - 1} + \frac{15518 \cdot \lambda^2}{38,9 \cdot \lambda^2 - 1}\right) \cdot \frac{0,5327}{10^8} \cdot \frac{p}{93214,6} \cdot \\ &\quad \frac{1 + 10^{-8} \cdot (0,5953 - 0,009876 \cdot t) \cdot p}{1 + 0,003661 \cdot t} \cdot L = 1,43 \cdot 10^{-4} \cdot L\end{aligned}\quad (22)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial l_E}{\partial \lambda} &= \left(\frac{-2 \cdot 2333983 \cdot \lambda}{(130 \cdot \lambda^2 - 1)^2} + \frac{-2 \cdot 15518 \cdot \lambda}{(38,9 \cdot \lambda^2 - 1)^2}\right) \cdot \frac{1 + 0,5327 \cdot (x - 0,0004)}{10^8} \cdot \\ &\quad \frac{p}{93214,6} \cdot \frac{1 + 10^{-8} \cdot (0,5953 - 0,009876 \cdot t) \cdot p}{1 + 0,003661 \cdot t} \cdot L \\ &\quad - \exp\left(\ln(611,2) + \frac{17,62 \cdot t_{dp}}{243,62 + t_{dp}}\right) \cdot 0,0384 \cdot \frac{2}{\lambda^3} \cdot 10^{-10} \cdot L = -1,23 \cdot 10^{-5} \cdot L \left(\frac{1}{\mu\text{m}}\right)\end{aligned}\quad (23)$$

a) temperatura powietrza

Temperatura powietrza jest mierzona tym samym mostkiem oporowym, co temperatura płytki wzorcowej. Niepewność złożona określenia temperatury powietrza $u(t)$ składa się z niepewności pochodzącej od:

- mostka oporowego,
- wzorcowania czujnika temperatury powietrza,
- równania interpolacyjnego dla czujnika temperatury,
- dryftu wskazań temperatury pomiędzy wzorcowaniami,
- efektu samopodgrzewania czujnika prądem pomiarowym,*
- gradientu temperatury wokół czujnika.*

b) ciśnienie powietrza

Ciśnienie atmosferyczne podczas pomiaru mierzone jest za pomocą miernika ciśnienia bezwzględnego połączonego z komorą pomiarową za pomocą cienkiej rurki. Dzięki temu miernik podaje wartość ciśnienia występującego na pewnej wysokości we wnętrzu komory. Niepewność złożona określenia ciśnienia $u(p)$ składa się z niepewności związanej z:

- wzorcowaniem czujnika ciśnienia,
- stabilnością krótkoterminową czujnika,*
- wysokością umieszczenia czujnika ciśnienia (gradient ciśnienia),
- rozdzielczością przetwornika ciśnienia.*

c) wilgotność powietrza

Wilgotność powietrza jest określana na podstawie wskazań miernika punktu rosy, który za pośrednictwem cienkiej rurki i pompy wymuszającej przepływ powietrza do pomiaru mierzy wilgotność wewnątrz komory pomiarowej interferometru. Niepewność złożona określenia wilgotności powietrza $u(t_{dp})$ składa się z niepewności związanej z:

- wzorcowaniem miernika punktu rosy,
- równaniem Magnus'a stosowanym do przeliczeń,
- rozdzielczością interfejsu.*

d) zawartość CO₂ w powietrzu*

Ze względu na niewielki wpływ zmian zawartości CO₂ w powietrzu na wynik pomiaru, do obliczeń podczas wzorcowania program komputerowy używa stałej wartości przyjętej np. na podstawie badań. Niepewność $u(x)$ określenia zawartości CO₂ w powietrzu związana jest z występującym odchyleniem rzeczywistej zawartości CO₂ od tej wartości.

e) długość fali lasera wzorcowego

Niepewność $u(\lambda)$ określenia długości fali świetlnej, związana z niepewnością wzorcowania lasera, po uwzględnieniu współczynnika wrażliwości jest o kilka rzędów wielkości mniejsza od pozostałych i może być pominięta.

f) wzór Edlen'a

Niepewność $u(E)$ związana jest z przybliżonym charakterem empirycznego wzoru Edlen'a i jest opisana w literaturze [5, 10].

3.4. Adiustacja układu optycznego interferometru

Z powodu niedokładności w adiustacji optyki interferometru, wiązka pomiarowa nie jest równoległa do osi płytki wzorcowej. Dodatkowo średnica wyjściowa źródła światła (średnica światłowodu) oraz wartość ogniskowej kolimatora wpływa na niepewność pomiaru.

Poprawka l_{Ω} związana z adiustacją układu optycznego interferometru jest wyrażana wzorem:

$$l_{\Omega} = \left(\frac{a^2}{16f^2} + \frac{\Delta x^2}{2f^2} \right) \cdot L \quad (24)$$

gdzie:

a – średnica światłowodu,

f – ogniskowa kolimatora,

Δx – przesunięcie poprzeczne wiązki świetlnej względem osi optycznej interferometru.

Niepewność standardową $u(l_{\Omega})$, związaną z adiustacją optyki interferometru, można zapisać w postaci:

$$u^2(l_\Omega) = u_1^2(l_\Omega) + u_2^2(l_\Omega) \quad (25)$$

gdzie: $u_1(l_\Omega)$, $u_2(l_\Omega)$ – niepewności otrzymane po zróżniczkowaniu wzoru na poprawkę l_Ω względem a , f oraz Δx ; składowa $u_1(l_\Omega)$ związana jest z niepewnością określenia średnicy światłowodu i długości ogniskowej kolimatora, natomiast składowa $u_2(l_\Omega)$ jest wyrazem drugiego rzędu.

Niepewności $u_1(l_\Omega)$ i $u_2(l_\Omega)$ wynoszą odpowiednio:

$$u_1^2(l_\Omega) = \left(\frac{aL}{8f^2}\right)^2 \cdot u^2(a) + \left(\frac{-a^2L}{8f^3}\right)^2 \cdot u^2(f) \quad (26)$$

$$u_2^2(l_\Omega) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{L}{f^2}\right)^2 \cdot u^4(\Delta x) \quad (27)$$

gdzie:

$u(a)$ – niepewność określenia średnicy światłowodu,

$u(f)$ – niepewność określenia wartości ogniskowej kolimatora,

$u(\Delta x)$ – niepewność określenia przesunięcia poprzecznego wiązki pomiarowej.

Pozostałe składowe wyższego rzędu są pomijalnie małe.

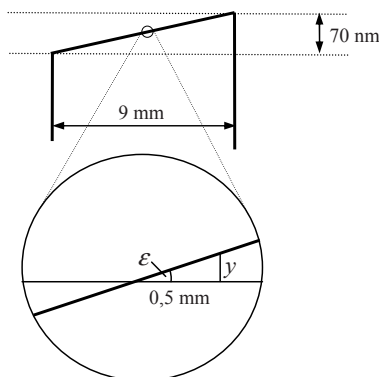
3.5. Błąd czoła fali*

Wszelkie aberracje czoła fali spowodowane przez układ optyczny również powodują niepoprawny pomiar reszty ułamkowej. Niepewność $u(\delta l_A)$, związana z błędem czoła fali, wynika z niedoskonałości elementów optycznych interferometru i związana jest z krzywizną czoła emitowanej fali świetlnej. Algorytm obliczeniowy kompensuje częściowo wpływ niedoskonałości optyki, jednak nie jest w stanie w pełni go wyeliminować.

3.6. Odchylenie od płaskości i zmienność długości płytki wzorcowej*

Niepewność $u(\delta l_G)$ związana jest z występowaniem odchylenia od płaskości powierzchni pomiarowych i zmiennością długości płytek wzorcowych. Te niedoskonałości w wykonaniu płytek wzorcowych sprawiają, że każde przemieszczenie punktu pomiaru długości środkowej na powierzchni pomiarowej płytki może spowodować powstanie zauważalnej różnicy w wyniku. Zmienność długości ma większy wpływ na wartość odchylenia długości środkowej od długości nominalnej niż odchylenie od płaskości przy porównywalnej wartości tych odchyleń. Dodatkowo dla porównywalnych wartości zmienności długości, większy efekt występuje w kierunku poprzecznym niż podłużnym powierzchni pomiarowej.

Przyjmując niepewność określenia centrum geometrycznego powierzchni pomiarowej płytki wzorcowej równą 0,5 mm, przy dopuszczalnej dla klasy K zmienności długości wynoszącej 70 nm (dla płytki wzorcowej o długości krótszej krawędzi wynoszącej 9 mm) otrzymujemy przypadek jak na rys. 3.



Rys. 3. Efekt nierównoległości powierzchni pomiarowych płytki wzorcowej

Na podstawie powyższego rysunku można zapisać:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{70 \text{ nm}}{9 \text{ mm}} = \frac{y}{0,5 \text{ mm}} \quad (28)$$

3.7. Grubość warstwy przywarcia*

Długość środkowa płytki wzorcowej mierzonej interferencyjnie jest zdefiniowana w przywarcu do pomocniczej płytki interferencyjnej lub stolika pomiarowego i zawiera w swojej definicji warstwę przywarcia. Ze względu na takie czynniki jak technika przywierania, chropowatość powierzchni, zanieczyszczenia, itp. warstwa przywarcia ma zmienną wartość podczas pomiaru kolejnych płytek. Zmienność grubości warstwy przywarcia jest istotnym źródłem niepewności pomiaru płytek wzorcowych metodą interferencyjną.

3.8. Zmiana fazy fali przy odbiciu*

Do skorygowania wyników uzyskanych metodą interferencyjną używana jest poprawka na korekcję fazy wyznaczana metodą pomiaru stosu płytek wzorcowych. Jednak różnice w jakości powierzchni pomiarowych płytek wzorcowych i stolika powodują różnice między wynikami uzyskanymi metodami optycznymi a wynikami pomiaru na komparatorze.

Metoda stosu daje w wyniku wartość średnią dla całego kompletu płytek wzorcowych, jednakże prawdziwa wartość poprawki może różnić się dla poszczególnych płytek. Można wyróżnić dwa źródła niepewności: związane z różnicami w stałej materiałowej, spowodowane przez zanieczyszczenia i różnice w materiale oraz związane z różnicami w chropowatości powierzchni.

Wyznaczenie poprawki l_{φ} metodą stosu polega na zmierzeniu czterech płytek indywidualnie, a następnie na zmierzeniu wykonanego z nich stosu.

Poprawka na zmianę fazy wyznaczana jest ze wzoru:

$$l_{\varphi} = \frac{1}{m-1} \cdot \left(l_p - \sum_{i=1}^m l_i \right) \quad (29)$$

gdzie:

m – ilość płytek wzorcowych użytych do wykonania stosu,

l_p – zmierzona długość stosu,

l_i – mierzone długości płytek wchodzących w skład stosu.

Wyznaczenie poprawki polega więc przede wszystkim na wyznaczeniu różnicy między długością stosu, a sumą długości płytek wchodzących w jego skład.

Ponieważ jest to pomiar względny, skorelowane składniki niepewności zredukują się do zera przy sumowaniu ze składnikami niepewności przy pomiarze stosu. Pozostaną jedynie te składniki, które charakteryzują się zmiennością w krótkim okresie czasu. Niepewność złożona związana z poprawką na zmianę fazy jest więc sumą składników nieskorelowanych niepewności pomiaru:

$$u^2(l_{\varphi}) = \frac{1}{(m-1)^2} \cdot u^2(l_p) + \frac{1}{(m-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^m u^2(l_i) = \frac{1}{(m-1)^2} \cdot \sum_{i=1}^{m+1} u^2(l_i) \quad (30)$$

gdzie $m+1$ składników sumy oznacza m płytek wzorcowych oraz stos, natomiast $u(l_i)$ są nieskorelowanymi składnikami niepewności pomiaru.

Ze względu na fakt, że płytki używane do tworzenia stosu mają stosunkowo niewielkie wartości długości nominalnych, tak więc nieskorelowane składniki niepewności zależne od długości są pomijalnie małe.

Uwzględniając składowe mające istotny wpływ na niepewność można zapisać:

$$u^2(l_{\varphi}) \approx \frac{m+1}{(m-1)^2} \cdot \left[u^2(F) + u^2(\delta l_A) + u^2(\delta l_G) + u^2(\delta l_w) \right] \quad (31)$$

Na niepewność określenia poprawki mają w związku z tym wpływ poniższe źródła:

- odczyt reszty ułamkowej,*
- błąd czoła fali,*
- odchylenie od płaskorównoległości powierzchni,*
- grubość warstwy przywarcia.*

Zakłada się, że niepewność związana z różnicami we właściwościach optycznych powierzchni pomiarowych płytek i stolika, takich jak np. chropowatość powierzchni, została zawarta w niepewności określenia poprawki na zmianę fazy.

4. Podsumowanie

Powyżej przedstawione zostały źródła niepewności przy wzorcowaniu płytek wzorcowych metodą interferencyjną reszt ułamkowych, na przykładzie automatycznego interferometru laserowego GBI300, które wnoszą istotny wkład do niepewności złożonej. Złożona niepewność pomiaru przy wykorzystaniu tej klasy interferometrów należy do najniższych na świecie.

Literatura

- [1] *Wzorce długości. Płytki wzorcowe.* PN-EN ISO 3650, 2000.
- [2] *Automatic Gaugeblock Interferometr – User manual.* Hexagon Metrology Ltd., 2004.
- [3] *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik.* Wydawnictwo GUM, 1999.
- [4] *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu.* Dokument EA-4/02, 1999.
- [5] J. E. Decker, J. R. Pekelsky: *Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry.* Metrologia nr 33, str. 479-493, 1997.
- [6] J. Piotrowski, K. Kostyrko: *Wzorcowanie aparatury pomiarowej.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2000.
- [7] J. Arendarski: *Niepewność pomiarów.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [8] B. Edlén: *The refractive index of air.* Metrologia nr 2, 1966.
- [9] K. P. Birch, M. J. Downs: *An updated Edlén Equation for the refractive index of air.* Metrologia nr 30, 1993.
- [10] G. Bönsch, E. Potulski: *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae.* Metrologia nr 35, str. 133-139, 1998.